



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE- UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**PROPOSTA DE MINIMIZAÇÃO NO USO DE ÁGUAS UTILIZANDO O
DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA
EM UMA CERVEJARIA**

Arthur Esteves da Costa Mothé Barreto

SÃO CRISTÓVÃO, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**PROPOSTA DE MINIMIZAÇÃO NO USO DE ÁGUAS UTILIZANDO O
DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA
EM UMA CERVEJARIA**

Trabalho final apresentado ao Departamento
de Engenharia Ambiental da Universidade
Federal de Sergipe, como parte integrante dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Profa. Dra. Inaura Carolina Carneiro da Rocha

Arthur Esteves da Costa Mothé Barreto

SÃO CRISTÓVÃO, 2019

Trabalho apresentado e aprovado em 12 de abril de 2019 pelo Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Sergipe, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Inaura Carolina Carneiro da Rocha
Orientadora

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Jailton Marques
Universidade Federal de Sergipe- DEAM/CCET

Prof. Dr. Bruno Santos Souza
Universidade Federal de Sergipe- DEAM/CCET

Profa. Dra. Inaura Carolina Carneiro da Rocha
Universidade Federal de Sergipe- DEAM/CCET

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter abençoado minha jornada até aqui, sou grato por tudo que pude viver e pela saúde que tenho. Em seguida, à minha maravilhosa família, razão da minha existência, serei eternamente apaixonado por vocês e dedico essa conquista como forma de agradecimento a tudo que me foi proporcionado, principalmente ao amor da minha vida: minha mãe Márcia Esteves. De igual forma a meu grande guerreiro e pai Ralph Mothé. À minha também guerreira-irmã Letícia, que me acompanha e serve de exemplo desde sempre, e que me permitiu ser tio de minhas anjinhas Sophia e Alice. Agradeço pela sorte de conviver com minha segunda mãe e tia Gilda Esteves e, em especial, a meus avós Raymunda Esteves e José Ferreira da Costa, que, por muita sorte divina, ainda me iluminam com vida e poderei comemorar pessoalmente essa vitória com eles. Aos meus familiares de Aracaju e do Rio de Janeiro, meu querido Vovô Goiaba e, em homenagem especial, a Vovó Nilda- meu anjo que foi ao céu ano passado, agradeço por todo carinho nos poucos momentos que passamos juntos. Obrigado por formarem meu caráter e postura.

Aos meus grandes amigos do ensino médio, à importantíssima Guild e amigos da UFS que alegraram este processo e o tornou mais leve.

À minha melhor amiga e namorada Letícia San, que foi meu ponto de apoio desde sempre, se fez extremamente presente e tornou este caminho muito mais simples, me dando luz e carinho quando já estava esgotado, me tranquilizando e sempre me fazendo rir. Obrigado de verdade pela companhia nas noites sem dormir, jornadas de estudos e milhões de horas conversadas.

Aos meus mestres, professores e professoras da Engenharia Ambiental, curso em que fui feliz e sortudo de escolher. Em especial à minha amiga e paciente orientadora, Inaura Carolina, que me guia desde o PIBIC e matérias curriculares, obrigado por todos os puxões de orelha e formação profissional. De igual forma, à minha primeira mentora, Daniella Rocha, que acreditou em mim nos primeiros períodos, sou grato pelas experiências. Não poderia deixar de agradecer à enciclopédia viva, Dr. Jailton Marques, detentor de um conhecimento e coração enormes, obrigado pelos ensinamentos.

Ao André da cervejaria local, que abriu as portas para que eu pudesse realizar meu estudo, mas principalmente ao cervejeiro Vitor, que foi bastante solícito e também foi um ótimo professor.

Por fim, agradeço à, com certeza, melhor experiência acadêmica que pude ter, minha querida empresa júnior e poderia dizer que quase uma filha: Easy Jr. Obrigado a todos que acreditaram e compraram essa briga (Pri, Luquinhas, Alanna, Léo, Kisley, Nicole) e demais amigos da antiga e nova gestão, aguardarei ansiosamente para ver até onde voaremos. Voa, Easy!

RESUMO

É de conhecimento amplo que há uma crescente demanda mundial por água nos setores social, agropecuário, comercial e industrial. Em particular, na indústria cervejeira, este insumo representa 93% da matéria-prima e atua como agente de maior volume na limpeza dos tanques e da planta industrial, em geral. Nesse contexto, surgem ferramentas para orientar a gestão dos recursos consumíveis e diminuir os custos operacionais, com destaque para a Integração de Processos (IP) e suas derivações, a exemplo do *Pinch* e do Diagrama de Fontes de Água (DFA). Assim, o objetivo do presente trabalho foi implementar uma rotina de cálculos do DFA a um empreendimento cervejeiro sergipano, a fim de obter cenários de minimização do consumo de água através do seu reuso, para avaliação técnico-econômica dos cenários gerados. Os resultados demonstram que a escolha do *software* Mathcad Prime para execução dos cálculos, apresentou-se como adequada por sua acessibilidade e interface relativamente simples para a criação de diversos cenários (sem e com reuso das correntes internas). De posse da rotina validada, utilizando dados do mesmo setor, foi possível aplicá-la aos dados de DQO (Demanda Química de Oxigênio) obtidos de fermentadores da cervejaria em estudo. Dessa maneira, foi obtido como melhor resultado a redução de 45,33% de água na operação de limpeza dos tanques fermentadores. Além disso, foi realizada uma avaliação técnico-econômica para os cenários gerados, tendo sido propostas sugestões de equipamentos e adaptações necessárias, bem como foi realizada a análise do investimento necessário utilizando a ferramenta “*payback*” simples. Contudo, concluiu-se que é pouco recomendável o investimento na cervejaria deste estudo, uma vez que os tanques são de pequeno porte e a frequência das operações de limpezas são baixas.

Palavras-chave: Diagrama de Fontes de Água (DFA), Minimização da água, Efluente de cervejaria, *Water pinch*.

ABSTRACT

It is well known that there is a growing world demand for water in the social, agricultural, commercial and industrial sectors. In particular, in the brewing industry, this raw material represents 93% of the raw material and acts as a major agent in cleaning the tanks and the industrial plant in general. In this context, there are tools to guide the management of consumable resources and reduce operational costs, especially Process Integration (PI) and its derivations, such as the Pinch and the Water Sources Diagram (DFA). Thus, the objective of the present work was to implement a routine of calculations of the DFA to a sergipano brewery project, in order to obtain scenarios to minimize water consumption through its reuse, for the technical-economic evaluation of the scenarios generated. The results show that the choice of the Mathcad Prime software to perform the calculations was adequate because of its accessibility and relatively simple interface for the creation of several scenarios (without and with reuse of internal currents). Using validated data, using data from the same industry, it was possible to apply it to COD (Chemical Oxygen Demand) data obtained from fermenters of the brewery under study. Thus, the best result was the reduction of 45.33% of water in the fermentation tank cleaning operation. In addition, a technical-economic evaluation was carried out for the scenarios generated, and suggestions were made for necessary equipment and adaptations, as well as the necessary investment analysis using the simple payback tool. However, it was concluded that the investment in the brewery of this study is not recommended, since the tanks are small and the frequency of the cleaning operations are low.

Keywords: Water Source Diagram (WSD), Water minimization, Brewery effluent, Water pinch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Interface principal do Programa MINEA.....	19
Figura 2- DFA gerado através do programa MINEA.....	20
Figura 3- Processo típico de uma cervejaria	24
Figura 4- Exemplos dos insumos utilizados pela cervejaria	27
Figura 5- Operação e controle do processo de mosturação.....	28
Figura 6- Tanques de Mosturação	28
Figura 7- Planta industrial da cervejaria local com destaque aos tanques de fermentação.	29
Figura 8- Fluxograma do processo produtivo da cervejaria local	30
Figura 9- Amostras coletadas na cervejaria provenientes das etapas de limpeza do tanque de fermentação.	35
Figura 10- Representação de uma estrutura básica do DFA.	37
Figura 11- Fluxograma para execução do Programa Sem Reuso no MATHCAD.	42
Figura 12- Cenário do Diagrama de Fontes de Água Sem Reuso para 4 intervalos.	44
Figura 13- Configuração de uma rede de água Sem Reuso onde há divisão de correntes, representada por D.	45
Figura 14- Fluxograma para execução do Programa Com Reuso no MATHCAD.	48
Figura 15- Possibilidade de fluxograma para um cenário do DFA Com Reuso.....	50
Figura 16- Rede de Água com máximo reuso.	51
Figura 17- DFA base para aplicação à cervejaria e geração de cenários	55
Figura 18- Resultados da aplicação ao programa do Mathcad Sem Reuso.....	56
Figura 19- DFA contendo os resultados obtidos pelo código do Programa Sem Reuso.....	57
Figura 20- DFA Com Reuso da cervejaria	59
Figura 21- Resultados da aplicação ao programa do Mathcad Com Reuso	60
Figura 22- Rotina de lavagem dos tanques e consumo geral dos produtos de limpeza.	61
Figura 23- Planta industrial para o Cenário 1 com válvulas temporizadoras	63
Figura 24- Planta industrial para o Cenário 2 com tanques de armazenamento	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Distribuição percentual de água no Brasil.....	13
Tabela 2- Insumos incorporados na fabricação da cerveja.....	22
Tabela 3- Consumo de água em cada operação de uma cervejaria.....	22
Tabela 4- Valores de DQO de amostras do efluente de limpeza de um tanque fermentador da cervejaria.	35
Tabela 5- Tabela de Oportunidades do presente estudo	36
Tabela 6- Tabela de oportunidades utilizada como referência para a criação da rotina no Mathcad	37
Tabela 7- Resultados do DFA aplicado a dois cenários em uma cervejaria em Mirre (2012).	53
Tabela 8- Tabela de oportunidades considerando um cenário intermediário de produção da cervejaria local.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD- *Computer aided design*

DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio

DFA- Diagrama de Fontes de Água

DQO- Demanda Química de Oxigênio

EAM- Espectrofotometria de Absorção Molecular

IP- Integração de processos

P+L- Produção mais limpa

SST- Sólidos Suspensos Totais

UV- Ultravioleta

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Usos da Água	13
2.2. Gestão Sustentável e as Ferramentas de Gestão Industrial	15
2.3. O Diagrama de Fontes de Águas	16
2.3.1. Origem e Aplicações	16
2.3.2. Procedimento DFA em <i>Softwares</i>	18
2.4. O Processo de Fabricação de Cerveja	21
3. METODOLOGIA	26
3.1. Estudo de caso: cervejaria sergipana	26
3.1.1. Seleção de operações com possibilidade de reuso de água	31
3.1.2. Seleção de parâmetros na cervejaria	34
3.2. Implementação da Rotina de Cálculos do DFA no Mathcad	36
3.2.1. O Cenário “Sem Reuso”	39
3.2.2. Programa Com Reuso e a validação da rotina aplicada a uma cervejaria	46
3.3. Avaliação Econômica	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Validação da Rotina	53
4.2. Definição dos Cenários	53
4.3. Avaliação de Cenários Gerados pelo DFA - Técnico/Econômica	61
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

A água é uma substância compreendida como essencial para o homem e suas atividades domiciliares, comerciais ou industriais. Além de ser considerada solvente universal é uma das poucas substâncias que encontramos nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso (MMA, 2009). Em vista da pluralidade de aplicações deste insumo, surge uma grande demanda que suscita em disputas pelo recurso, em escassez e, por conseguinte, em elevado valor econômico, a depender da região. Ainda de acordo com UNESDOC (2016), boa parte das indústrias utiliza grandes volumes de água fresca como matéria prima para a remoção de impurezas, geração de vapor ou refrigeração - o que representa no Brasil cerca de 19% do consumo total de água limpa e de boa qualidade. Em especial, têm-se as cervejarias, onde a água representa 93% da matéria prima para obtenção do produto final e atua como agente majoritário na limpeza dos tanques produtores (REBELLO, 2009).

Sabe-se ainda que cada processo industrial demanda um volume característico deste recurso e gera um resíduo correlacionado à atividade exercida. Desta forma, optar pelo tratamento correto do efluente pode não ser viável economicamente em alguma ocasião, tendo em vista que os custos operacionais industriais costumam ser elevados, mas se faz necessário. A rigor, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Nº 9.433/97, enquadra os corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes deste recurso, estabelecendo padrões que devem ser atendidos. Em razão da não conformidade com as exigências, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), lei Nº 6.938/1981, propõe ações de responsabilidade civil por danos ao meio ambiente, como a obrigação de recuperar e/ou indenizar os prejuízos causados.

Em vista disso, ferramentas vêm sendo desenvolvidas para auxiliar a gestão de recursos, insumos, efluentes, bem como a redução de custos operacionais, a exemplo da Integração de Processos (IP). Neste contexto, têm-se a tecnologia descrita por Wang e Smith (1994), conhecida por *Water Pinch*, a qual preconiza ao máximo o reuso das redes de águas e de efluentes gerados internamente. Seguindo a mesma premissa, têm-se o Diagrama de Fontes de Água (DFA), que é visto como um sucessor da tecnologia *Pinch* (MOHAMMADNEJAD *et al.*, 2010).

A metodologia do DFA é relativamente simples quando comparada aos demais métodos matemáticos, seus cálculos são repetitivos e podem demandar uma grande mão-de-obra. Desta maneira, torna-se interessante sua aplicação aliada a *softwares* inerentes à engenharia, como o Mathcad, Matlab, Excel e MINEA, visto que otimizam a solução de equações para a criação de diversos cenários com eficiência.

Assim, o objetivo geral do presente trabalho consistiu em implementar uma rotina de cálculos do DFA a um empreendimento cervejeiro sergipano de pequeno porte, a fim de obter cenários de minimização do consumo de água potável através do reuso de correntes.

Por sua vez, os objetivos específicos contemplaram: i) validar a rotina de programação construída no *software* Mathcad; ii) selecionar o parâmetro que servirá de componente referência para o estudo de caso; iii) gerar cenários de reuso de água para a cervejaria local; iv) avaliar a viabilidade técnico-econômica das modificações necessárias para os cenários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Usos da Água

“A escassez de água no mundo não é mais uma hipótese ou teoria, galgou o tempo das previsões catastróficas para irromper concreta diante de nossa geração. Uma tradução disso é a fome, a pobreza extrema, as disputas violentas a dizimar populações inteiras, agravando o fosso social e econômico entre os países ricos e os pobres” (LUIZ CARLÃO, 2018).

A Revolução Industrial foi um marco no século XVIII e XIX e trouxe consigo modificações permanentes à sociedade como, por exemplo, o fomento ao consumismo (TAVARES *et al.*, 2017). Na tentativa de se adequar ao mercado competitivo e aos países emergentes, as indústrias aumentaram a produção e a diversificação de produtos para atender as novas demandas e buscas por inovações. Esta prática, por consequência, provocou nas indústrias o aumento da exploração de recursos naturais, destacando-se a água como um dos principais alvos (TORRES *et al.*, 2018).

Entretanto, este recurso possui uma distribuição desigual no mundo. Sabe-se que a Ásia, o continente mais populoso, contempla 31,6% da disponibilidade total de água doce superficial do planeta, enquanto as Américas contam com 13,6% da população mundial e 41% da água disponível (AUGUSTO *et al.*, 2012). No Brasil, este cenário de desigualdade pode ser verificado através da Tabela 1, que facilita a compreensão da escassez hídrica em algumas regiões do país.

Tabela 1- Distribuição percentual de água no Brasil

Região	% Disponível	% População
Norte	68,5	6,8
Nordeste	3,3	28,9
Sudeste	6,0	42,7
Sul	6,5	15,1
Centro-Oeste	15,7	6,4
Total	100,0	100,0

Fonte: (CÂMARA, 2009 *apud* AUGUSTO *et al.*, 2012).

Sabe-se ainda que a água é um elemento essencial para o funcionamento das indústrias e geração de energia no país, resultando em um consumo elevado por esses setores. No Brasil, os setores industrial e energético são responsáveis por cerca de 19% do uso total de água, sendo 9,2% de uso apenas no meio urbano (UNESCO, 2016 e Governo do Brasil, 2018). Podem ser destacadas as cervejarias, com um coeficiente de retirada de 13.330 litros de água fresca por dia (L.empregado/dia); as refinarias de petróleo consumindo 15.051 L.empregado/dia; as indústrias de papel que consomem cerca de 8.167 L.empregado/dia e as indústrias têxteis exaurindo 2.908 litros diariamente (ANA, 2017). Nesse sentido, percebe-se que o elevado consumo de água pode refletir diretamente no seu custo financeiro, somado à má gestão dos recursos hídricos, por mudanças climáticas e atuais crises de armazenamento d'água nos reservatórios das metrópoles, o que pode inviabilizar alguns processos ou operações industriais.

Nesta linha, pode-se citar, em especial, o Estado de São Paulo que é impactado pelas variações hidrológicas, densamente povoado, que possui apenas 6% do recurso hídrico disponível no país e uma alta demanda para a indústria, agricultura, irrigação, hidrelétrica e abastecimento público (ISA, 2014 *apud* SORIANO *et al.*, 2015). Igualmente, as crises hídricas também atingem a região Nordeste e impactam negativamente o setor econômico e energético, a saber de Sergipe onde houve a redução de 44,62% da vazão do Rio São Francisco na barragem da Hidrelétrica de Xingó (Governo do Estado de Sergipe, 2017).

Deste modo, devido não somente ao uso deste recurso finito em larga escala pelo setor industrial, como principalmente pela má qualidade e menor quantidade que estas águas são devolvidas ao meio ambiente (BEAL, FERREIRA e RAUBER 2014 *apud* TORRES *et al.*, 2018), tem-se percebido uma maior pressão da sociedade e exigência dos órgãos ambientais. Em decorrência deste novo cenário, as organizações assumiram um maior compromisso de qualidade com seus produtos oferecidos, utilizando-se de estratégias de maior cunho sustentável e, assim, beneficiando os consumidores e o meio ambiente (MIRRE, 2012).

Por conseguinte, com a necessidade de soluções tecnológicas que viabilizassem o aproveitamento racional de matérias-primas e recursos energéticos para o sistema de produção industrial, a Integração de Processos (IP) surge como uma alternativa no cenário dos anos de 1970 e 1980. Através da IP pode-se projetar a sustentabilidade dos processos ao torná-los mais eficientes, reduzindo o impacto ambiental oriundo de tais atividades, e é nesse

contexto, portanto, que o uso de tecnologias e ferramentas agrega à gestão industrial (MIRRE, 2012).

2.2. Gestão Sustentável e as Ferramentas de Gestão Industrial

Entende-se por gestão sustentável aquela que se baseia nos pilares da economia, sociedade e meio ambiente, preservando os recursos para as próximas gerações. A tríade deve ser adotada simultaneamente nas propostas de gestão ambiental empresarial, como uma unidade (FOO *et al.*, 2012).

Satisfazendo esse conceito, as ferramentas de gestão industrial podem ser usadas para analisar as redes de água e reduzir o consumo desnecessário de água fresca, reaproveitando ao máximo o excedente de processos internos da própria indústria (MOHAMMADNEJAD *et al.*, 2010), a exemplo da Tecnologia *Water Pinch*, descrita por Wang e Smith (1994) *apud* Mirre (2012), que foi desenvolvida inicialmente para minimizar o alto consumo de água nas indústrias de petróleo.

O Diagrama de Fontes de Água (DFA) segue a mesma premissa, sendo considerado, inclusive, um aprimoramento da tecnologia *Pinch*. Em verdade, é uma metodologia algorítmica baseada em regras heurísticas e em equações de integração mássica, onde são testadas diversas combinações entre correntes de processos, de modo a alcançar o máximo reuso de correntes (MOREIRA, 2009 *apud* MOURA, 2017).

Seguindo os princípios da *Pinch*, o DFA utiliza métodos gráficos para encontrar o ponto de convergência global e de variáveis como concentrações máximas de entrada/saída, vazão limite e vazão mássica de contaminantes, para obter resultados quantitativos e mensurar o quanto de água fresca deixou de ser consumida. Através de uma metodologia simplificada, se comparada a métodos de programação matemática, o DFA propõe reduzir o uso de água de boa qualidade, à medida que identifica oportunidades de reuso dentro dos processos industriais utilizando equações relativamente simples.

2.3. O Diagrama de Fontes de Águas

2.3.1. Origem e Aplicações

A origem do DFA pode ser observada nos estudos de Wang e Smith (1994), através da metodologia algorítmica-heurística apresentada, tendo como princípio os conceitos da tecnologia *Pinch* e da Integração de Processos. Estas são utilizadas para identificar cenários de oportunidades de reuso máximo e reciclo deste recurso, entre as operações industriais. Por sua vez, Castro *et al.* (1998) reportam as metodologias *MPT*, *Limiting Composite Curve* e, inclusive, o *WSD* (DFA) como alternativas de fácil aplicação para a regeneração e reuso de água fresca.

A eficiência das ferramentas de gestão industrial passa a ser constatada inicialmente no estudo de Yang *et al.* (2000), no qual através de uma Rede de Reutilização de Águas Residuais (*WWRN*), analisaram-se múltiplos contaminantes nas operações de uma Fábrica de Papel e de Galvanização, obtendo como resultado uma redução de 21,15% do consumo de água.

Logo em seguida, Silva *et al.* (2001) estenderam a aplicação do DFA para os casos de múltiplos contaminantes com regeneração e reuso. De forma semelhante, Gomes (2002) ampliou o algoritmo contemplando situações com múltiplas fontes de água, operações com perda de água, regeneração com reuso e regeneração com reciclo (MIRRE, 2012).

Dessa forma, anos após, Gomes *et al.* (2007) aplicaram o algoritmo em diversas situações envolvendo estudos de caso da literatura para um contaminante em um cenário industrial, apontando as situações em que o DFA sintetiza as transferências de massa: i) reuso de água; ii) viabilidade de múltiplas fontes hídricas externas na planta industrial; iii) perdas de água ao longo dos processos; iv) constrição da vazão; v) regeneração antes do reuso em outras operações; vi) regeneração seguida de reciclo.

Por fim, a ferramenta DFA passou a ser inserida no contexto de produção mais limpa (P+L) em indústrias e vista como uma alternativa eficiente para o uso sustentável de águas e a redução de efluentes industriais. Nesse sentido, o trabalho de Higa *et al.* (2007) se utiliza deste procedimento para sintetizar fluxogramas com regeneração e reuso de

água para múltiplos contaminantes, atingindo como resultado uma minimização da água consumida em 5,1% no cenário proposto.

Mohammadnejad *et al.* (2010) utilizaram métodos matemáticos aliados à tecnologia *Pinch* como uma alternativa de minimização do uso da água nas refinarias de petróleo, visto que é um setor de alto consumo energético. Foi realizada a análise, dois a dois, dos contaminantes: sólidos suspensos, dureza, DBO, tendo sido obtidas reduções do consumo de água fresca em até 40%.

De forma semelhante, o trabalho de Ulson de Souza *et al.* (2010) propõe o DFA para uma refinaria de petróleo com 6 operações, considerando 4 contaminantes (saís, matéria orgânica, amônia e gás sulfídrico) e aplica a regeneração com reuso das correntes. Os resultados obtidos nesse estudo demonstram a eficiência da metodologia, com uma redução de 64% no consumo de água.

Em Gomes *et al.* (2012) foram analisados três exemplos para validar a aplicabilidade do algoritmo proposto, e os resultados obtidos são comparáveis àqueles obtidos de outras metodologias que mostram desempenho aceitável. Assim, passou a contemplar multicontaminantes e, além disso, obteve um fluxograma e informações que podem ser usadas para estimar os custos envolvendo a rede de água.

De forma análoga, Yao *et al.* (2013) propõem novos cenários com foco no uso sistemático e aplicado de fontes externas para complementar as lacunas das metodologias *Pinch*, aperfeiçoando o procedimento para garantir uma viabilidade prática.

Retratando a metodologia como um mecanismo de gestão industrial sustentável, Moura (2017) aplicou o DFA num caso da literatura de uma Indústria de Papel. Sua análise foi focada no contaminante “sólidos suspensos totais” (SST) e obteve, reduções próximas a 30% da água captada.

Já no setor cervejeiro, Santos (2005) identificou oportunidades do uso racional da água nos processos de produção da cerveja como a lavagem de tanques e garrafas. De forma complementar, Lima e Walter (2017) afirmaram que a sustentabilidade é uma questão crescente para as cervejarias, que estão cada vez mais introduzindo ferramentas sustentáveis em suas operações.

Mirre (2012), por sua vez, analisou diversos setores de uma cervejaria, baseado nos dados referentes ao estudo de Tokos e Pintaric (2009) em que foram analisados os

parâmetros DQO de parte dos processos cervejeiros. Uma vez que o setor de produção, em particular, possui seis processos não-contínuos que consomem o total de 1.076 toneladas de água limpa por dia, Mirre (2012) aplicou o DFA neste setor, alcançando uma redução significativa de 45,20% deste atributo nos processos.

2.3.2. Procedimento DFA em *Softwares*

O procedimento do DFA atende algumas regras heurísticas que atuam como pilares para orientar uma melhor aplicação dos processos industriais. São elas (GOMES, 2007):

- Regra 1: Fontes externas de água são utilizadas somente na indisponibilidade de fontes internas;
- Regra 2: É necessário que a maior quantidade de contaminante seja transferida dentro do mesmo intervalo de concentração;
- Regra 3: Quando uma operação é dividida em vários intervalos, a prioridade de alocação provém da corrente da mesma operação, o que evita a divisão de operações;
- Regra 4: Quando há mais de uma fonte de água disponível, a escolha deve ser pela que contiver a mais alta concentração.

Obedecendo tais regras, torna-se possível aplicar o procedimento DFA, seja de forma manuscrita ou computacional. Todavia, diante do desenvolvimento de tecnologias e avanço no campo das ciências exatas e tecnológicas, a aplicabilidade de *softwares* para resolução e modelagem de problemas matemáticos se mostrou muito eficiente, em contrapartida à busca de soluções de modo convencional, dada a economias de tempo, recursos financeiros e humanos alcançados.

Com a revisão deste trabalho, observou-se na literatura e em periódicos atuais o crescente uso de ferramentas computacionais aplicadas ao reuso de água e a otimização do DFA. Com objetivo de guiar e facilitar o *design* de projetos, tais ferramentas são conhecidas como *computer-aided design* (CAD) (em português, projeto assistido por computador). Este fato, em geral, se explica pela característica de boa parte destes

softwares possuem uma interface simples e didática, permitindo maior velocidade de resolução de problemas e independência do usuário.

Nesse contexto, ressalta-se o esforço particular para a execução do método DFA, em vista da resolução de cálculos repetitivos e da possibilidade elevada de operações e multicontaminantes de interesse. Citam-se como exemplos o uso do *software* Matlab (Laboratório MATrix), utilizado na pesquisa de Ulson de Souza *et al.* (2010), assim como a plataforma Excel por Mirre *et al* (2011), através do programa computacional MINEA (SANTOS, 2007) exposto na Figura 1. Este último é voltado para a síntese de redes de transferência de massa, conforme a Figura 2, entretanto, soluciona o DFA sem gerar o balanço de contaminantes.

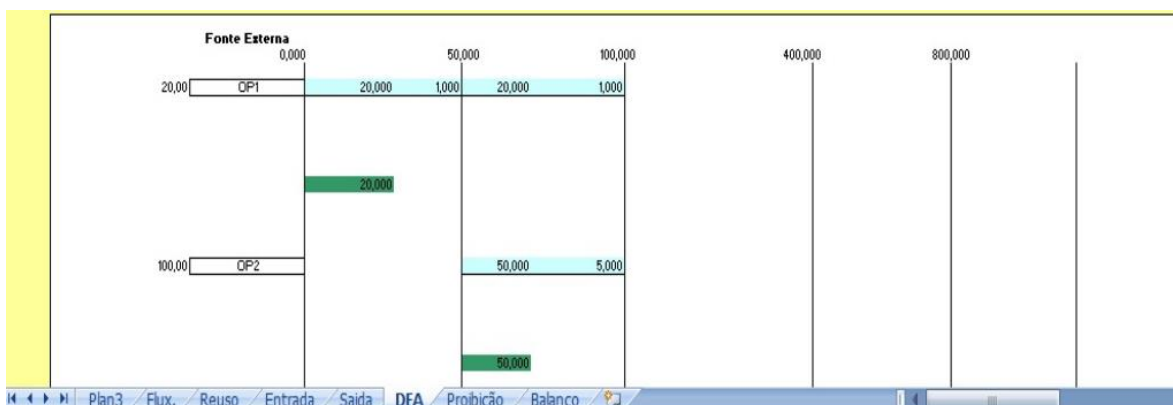
Figura 1- Interface principal do Programa MINEA

operação	Dados						Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponível	perda/ganho		
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000			Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	50,000			Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000			Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714			Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1								
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Gerar Linha Base de Concentrações
Calcular
Gerar Saida

Fonte: Mirre et al. (2011)

Figura 2- DFA gerado através do programa MINEA



Fonte: Mirre *et al.* (2011)

A aplicação e crescente uso de ferramentas computacionais ao reuso de água é notável em periódicos da área das engenharias. Nessa conjuntura, o uso do *software* Mathcad surge como uma ferramenta singular à implementação de uma rotina de cálculos que execute o procedimento DFA de forma prática. Por não ter sido encontrado na literatura aberta nenhum estudo que retratasse o uso associado do Mathcad com o DFA, infere-se que a mesma represente uma ferramenta ainda pouco explorada neste sentido. O Mathcad também contém uma interface simples de usar, permitindo que o usuário seja assistido na entrada de dados, no monitoramento do processamento de dados e na seleção de relatórios de dados na fase de pós-processamento de dados.

Destarte, o *software* selecionado para o presente estudo foi o Mathcad cujo desenvolvimento ocorreu em 1986 pela *Parametric Technology Corporation's* (PTC), uma empresa norte americana consolidada no mercado do CAD. O Mathcad possui versões estudantis e versões profissionais, tendo sido utilizada a versão Mathcad Prime 3.1 neste trabalho. As versões diferem em recursos e funções disponíveis no layout do *software*, ressalta-se que a versão estudantil é limitada por ser gratuita (PTC MATHCAD, 2018).

Portanto, a maior vantagem relacionada ao seu uso é que o mesmo pode ser alimentado com rotinas de cálculos que, a rigor, seriam dispendiosas em tempo e repetitivas para serem resolvidas a mão. Além do que, esta ferramenta possui grande capacidade interativa e didática que favorece a aprendizagem aplicada a diversos campos

da engenharia. Existem ainda manuais como o elaborado por Benker (1999), que orientam o uso prático do *software* para a resolução de problemas matemáticos, problemas iterativos, rotinas computacionais, elaboração de gráficos, cálculo analítico de integrais e derivadas, através deste sistema de álgebra computacional.

2.4. O Processo de Fabricação de Cerveja

Estima-se que o homem começou a utilizar bebidas fermentadas há 30 mil anos. A produção da cerveja teve seu início por volta de 8000 a.C. e foi desenvolvida paralelamente aos processos de fermentação de cereais (AQUARONE, 2001 *apud* MEGA *et al.*, 2011). A cerveja chegou ao Brasil em 1808, trazida pela família real portuguesa de mudança para o então Brasil colônia (CERVESIA, 2010 *apud* MEGA *et al.*, 2011).

A cerveja está definida na legislação brasileira como sendo a bebida obtida pela fermentação alcoólica de mosto, oriundo de malte de cevada e água potável, por ação de levedura, com adição de lúpulo. Parte do malte da cevada pode ser substituída por adjuntos como: arroz, trigo, centeio, milho, aveia e sorgo, todos integrais, em flocos ou a sua parte amilácea, e por carboidratos de origem vegetal, transformados ou não (CURI *et al.*, 2008 *apud* MEGA *et al.*, 2011). O termo adjunto pode ser definido como carboidratos de composição específica que suplementam o malte de cevada (ALMEIDA E SILVA, 2005 *apud* REBELLO, 2009).

Existem inúmeras marcas de cervejas e formas diferentes de produzi-las, seja artesanalmente ou industrialmente, de forma que são classificadas basicamente em dois tipos: *lager*, para as produzidas com baixa fermentação, e *ale* para alta fermentação (REBELLO, 2009). Entretanto, até os diferentes tipos de cerveja seguem um processo típico de fabricação e utilizam ingredientes considerados essenciais para sua produção. De acordo com Neto (2009) *apud* Rebello (2009), os principais ingredientes para fabricação estão listados na Tabela 2.

Tabela 2- Insumos incorporados na fabricação da cerveja

Ingredientes	% na fabricação
Água	85,0
Adjuntos (malte de cevada, griz de milho, lúpulo, açúcares, levedura cervejeira)	15,0

Fonte: Adaptado de Santos (2005)

É de conhecimento que a água é o maior componente da cerveja, representando 85% em sua fabricação, e suas propriedades físico-químicas são uns dos fatores mais significativos na qualidade final do produto. O consumo genérico de água em procedimentos operacionais de uma cervejaria apresenta-se conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3- Consumo de água em cada operação de uma cervejaria

Operações	% na fabricação
Limpeza e desinfecção	44,0
Preparo do mosto	20,0
Resfriamento	11,0
Outros fins (produção de vapor, doméstico, refeitório, etc) e perdas	25,0

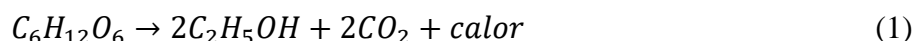
Fonte: Adaptado de UNEP (1996).

O processo de fabricação de cerveja inicia-se com a adição de água ao malte e insumos já moídos. A mistura é então cozida e o amido do malte convertido em açúcar, resultando em um líquido turvo e grosso, chamado de mosto. O mosto é filtrado e novamente fervido. Neste momento é adicionado o lúpulo, o responsável pelo sabor amargo da cerveja. Para seguir para seu próximo estágio, o mosto é resfriado. Ressalta-se que o lúpulo é considerado o “tempero da cerveja” pelos mestres cervejeiros e um dos mais significativos componentes na produção de cerveja para diferenciação dos produtos, sendo a quantidade e o tipo das mesmas informações dificilmente reveladas (MEGA *et al*, 2011).

Os grãos de cevada são enviados, após a colheita, para as maltarias, onde são submetidos à germinação controlada. Este processo induz os vegetais a produzirem diversas enzimas e

dentre elas as amilases. As amilases são responsáveis por reduzir o amido em açúcares fermentescíveis e consequente desenvolvimento microbiano, portanto, são fundamentais para a fabricação de cerveja (SOCIEDADE DA CERVEJA, 2010 *apud* MEGA *et al.*, 2011).

O processo de fermentação em cervejarias é a conversão processada pela levedura (fermento) de glicose, em etanol e gás carbônico, sob condições anaeróbicas. Esta conversão se dá com a liberação de calor, como ilustrado pela Equação 1:



De acordo com Linko *et al.* (1998) *apud* Rebello (2009) e Santos (2005), as etapas que regem o processamento da cerveja, de forma simplificada, podem ser definidas pelos seguintes itens:

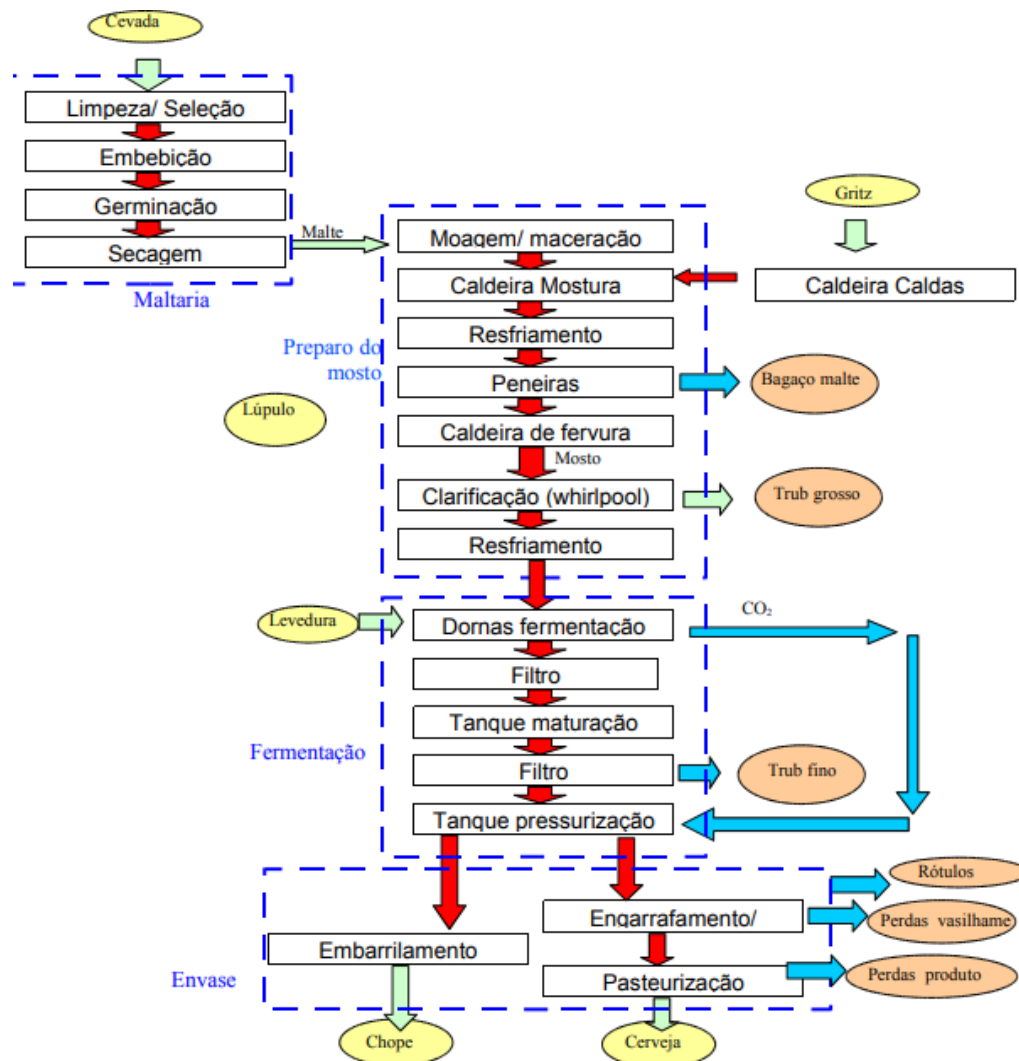
- i. **Malteação:** (germinação da cevada): o malte, em geral, é obtido em instalações dedicadas a este propósito, conhecidas como maltarias, que podem ou não ser anexas às empresas cervejeiras. As principais etapas de obtenção do malte são a limpeza e seleção de grãos, a embebição, germinação e a secagem do malte.
- ii. **Produção do mosto cervejeiro:** após preparar o malte ou adquiri-lo de uma maltaria (opção mais comum no Brasil), a cervejaria inicia a etapa de produção da cerveja propriamente dita, ou seja, a obtenção do mosto. O qual pode ser definido como uma solução aquosa de açúcares e nutriente das bactérias fermentadoras e produtoras de álcool.
- iii. **Fermentação:** uma vez o mosto tendo sido preparado, clarificado e resfriado, pode-se dar início a fermentação, processo central da indústria cervejeira. Que consiste em duas etapas:
 - a. **Aeróbia:** onde as leveduras se reproduzem, aumentando em quantidade de 2 a 6 vezes;
 - b. **Anaeróbia:** onde as leveduras realizam a fermentação propriamente dita, convertendo os açúcares presentes no mosto em CO₂ e álcool.

O processo de fermentação dura de 6 a 9 dias, obtendo-se, além do mosto fermentado, uma grande quantidade de CO₂, que é purificado e enviado para a etapa de carbonatação da cerveja.

iv. **Processamento final (filtração, estabilização, engarrafamento etc.):** com o fim da fermentação obtém-se o mosto fermentado, chamado também de cerveja verde, que já possui diversas características da cerveja a ser produzida. No entanto antes de proceder o envase do produto certas providências são necessárias, de modo a gaseificar a bebida, garantir sua qualidade e fornecer características organolépticas adicionais.

A descrição de um processo típico de cervejarias, contendo as etapas supracitadas para a fabricação de cerveja, está ilustrada na Figura 3:

Figura 3- Processo típico de uma cervejaria



Fonte: Santos (2005).

Contudo, diante das informações apresentadas, faz-se possível identificar as operações com possibilidades de otimização do consumo do recurso hídrico ou que, pelo menos, deveriam ser priorizadas para fins de avaliação de reuso. Nesse sentido, o DFA apresenta-se como uma alternativa interessante para reduzir o consumo de água nas cervejarias, especialmente se for aplicado às operações de limpeza e desinfecção, que são as operações de maior utilização deste insumo.

3. METODOLOGIA

3.1. Estudo de caso: cervejaria sergipana

O método de pesquisa adotado foi o estudo de caso, podendo ser classificado como exploratório, tendo sido planejado através de entrevistas e com coleta de dados por meio de visitas, medições *in situ* e fornecimento de informações pessoais da rotina de trabalho.

A cervejaria escolhida para ser o estudo de caso deste trabalho está localizada em Aracaju/SE. Foram realizadas três visitas técnicas, sendo a primeira ocorrida no dia 16 de setembro de 2018, em uma visita aberta à público, onde foi possível observar o porte da cervejaria, quantidade de equipamentos e operações. A segunda visita aconteceu no dia 11 de janeiro de 2019 e teve por objetivo selecionar as operações de interesse para o estudo, permitindo que fosse coletado as amostras no terceiro momento datado em 22 de fevereiro de deste ano.

O início das atividades produtivas ocorreu no mês de abril de 2018, com as devidas autorizações do Ministério da Agricultura e demais órgãos reguladores. Segundo o engenheiro de produção e também sócio-proprietário da cervejaria, a planta industrial foi construída em um galpão com área total de 800 m² e atualmente ocupa 547 m², estando passível de expansão. A área contempla equipamentos com volume de produção de 18 a 20 mil litros de cerveja por mês, valores que representam uma capacidade maior do que sua demanda mensal, correspondente a 7 mil litros.

Alguns dos insumos necessários para a produção cervejeira neste empreendimento - encontram-se ilustrados na Figura 4. Pode-se observar, portanto, que existem tipos distintos de um mesmo grão (Malte *Pale Ale* ou Caramelo) e, a depender da sua origem, resultam em uma cerveja com qualidade e características distintas, apresentadas no cardápio em diferentes rótulos.

Figura 4- Exemplos dos insumos utilizados pela cervejaria



Fonte: O autor (2019).

Para o mestre cervejeiro, a rigidez na seleção dos grãos é determinante para obtenção de um produto final com excelência, a perceber os maltes que são importados da Holanda ou Alemanha, por serem os de melhor qualidade existente no mercado. A pluralidade e a proporção dos insumos na composição da cerveja são o que distinguem os tipos de cervejas existentes no mercado, assumindo uma maior ou menor intensidade de sabor. Além da origem do grão, outras técnicas podem definir o resultado final, a saber, a escolha entre grãos torrados ou secos, cereais adicionais (arroz, milho, aveia, centeio, trigo), o tempo dos processos, dentre outros cuidados.

Após selecionadas as matérias primas, estas passam por um processo de quebra, a fim de tornar os nutrientes disponíveis para a fermentação. Uma vez finalizada a maturação (fermentação), que é a etapa de purificação do aroma e sabor, a cerveja é filtrada para se tornar límpida e transparente.

De forma simplificada, a produção realizada nessa cervejaria é dividida em etapas: a primeira é a brassagem ou mosturação, onde é efetuada a dissolução dos componentes em água cervejeira e depois em açucarados, obtendo-se o mosto. Essa etapa necessita da intervenção e adição manual do malte e cereais pelo cervejeiro, conforme ilustram a Figura 5 e a Figura 6, que expõem parte da instalação fabril e os 3 tanques de mosturação de volume de 500 L cada. Tal processo de fabricação dura em torno de 7 horas, e esta média de tempo encontra-se fragmentada nas 3 subetapas: mosturação, clarificação do mosto e fervura do mosto (Figura 8). Assim, têm-se como produto obtido o mosto, que, por definição, é uma solução aquosa que estará sujeita a ação das leveduras para ser transformada em cerveja.

Figura 5- Operação e controle do processo de mosturação.



Fonte: O autor (2019).

Figura 6- Tanques de Mosturação



Fonte: O autor (2019).

Depois de obtido o mosto, este é enviado ao fermentador, que a depender do tipo da cerveja a ser produzida, leva em torno de 20 a 30 dias, até conclusão da fermentação e maturação. Por sua vez, os tanques (10 unidades) de fermentação são automatizados e podem ser visualizados na Figura 7, ao passo que, o monitoramento destes é realizado através do painel de controle. Os volumes dos tanques fermentadores são de capacidades distintas: 600 L (2 unidades), 1150 L (4 unidades) e 2200 L (4 unidades). Dessa forma, foi elaborado um

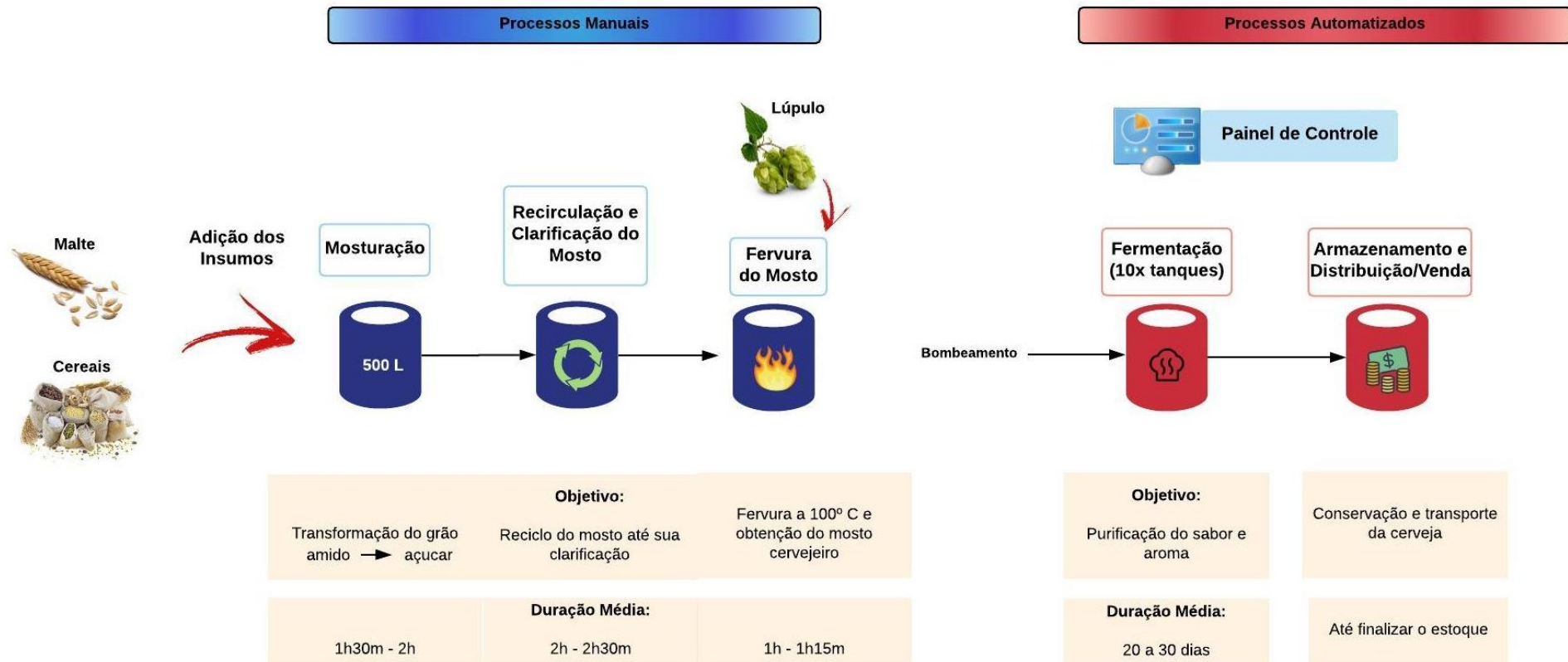
esquema do processo produtivo referente à cervejaria local, a partir do observado *in loco*, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 7- Planta industrial da cervejaria local com destaque aos tanques de fermentação.



Fonte: O autor (2019)

Figura 8- Fluxograma do processo produtivo da cervejaria local



Fonte: O autor (2019)

3.1.1. Seleção de operações com possibilidade de reuso de água

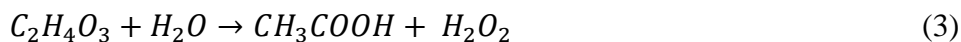
Uma vez observadas as operações da cervejaria, como a mosturação, clarificação do mosto, fervura do mosto e fermentação, apresentadas na Figura 8 e Tabela 3, percebeu-se que as operações de limpeza são as maiores consumidoras de água no processo de produção cervejeiro. Desta forma, fez-se necessário compreender a rotina de limpeza da cervejaria local para verificar possibilidade (s) de reuso.

De maneira sintetizada, ocorrem na cervejaria sergipana três técnicas de limpeza e desinfecção:

- 1) Com água filtrada corrente nos tanques: água corrente
- 2) Com soda cáustica em solução (3% em 60 L de H₂O), definido pela Equação 2:



- 3) Com ácido peracético em solução (0,3% em 60L de H₂O), definido pela Equação 3:



A primeira técnica é utilizada para lavagens rápidas dos tanques e ocorre com uma frequência de 1 a 3 vezes/dia, variável de acordo com o número de brassagens (bateladas). A segunda e terceira fazem parte da lavagem bruta e, apesar de acontecerem em média 1 vez por mês, requerem um elevado consumo de água. Nessa lavagem bruta, a soda cáustica é o agente desincrustante principal e, por isso, foi percebida uma demanda pelos cervejeiros, de tecnologias que provejam economia com o custo de aquisição da soda. De forma distinta, o ácido peracético funciona como um finalizador do processo de esterilização e é adicionado depois de concluída a limpeza com soda, a fim de preparar o tanque para o recebimento de um novo produto. Ressalta-se que a presença deste ácido na água de lavagem torna esta última etapa limitada ao reaproveitamento das correntes de água. Sendo assim, a operação selecionada com maior potencial para estudos de reuso é a de limpeza com soda caustica, ratificando o interesse exposto pelos próprios cervejeiros em diminuir o consumo deste produto.

De acordo com o fabricante Mustangpluron (2018), a soda cáustica (Pluron 327 AS) é indicada para limpeza de resfriadores, evaporadores, tubulações e equipamentos de aço inox em geral. A sua composição contém hidróxido de sódio, tensoativos não iônicos, veículo e

corante. Seu modo de usar em linhas quentes (predominante na cervejaria) indica a circulação de uma solução contendo *soda* (3%) + *água* (97%), durante 30 a 45 min.

Assim, através das informações obtidas *in loco*, fez-se uma estimativa da demanda volumétrica e financeira mensal para a preparação da água de limpeza, envolvendo água, soda cáustica e ácido peracético. Por conseguinte, analisaram-se separadamente os dois tipos de tanques principais da planta, os tanques mosturadores e fermentadores, de acordo com suas especificidades técnicas (Figura 8) e diferentes rotinas de limpeza. Isto posto, apresentam-se os devidos cálculos:

Mosturadores

a) Lavagem Rápida

- N° de tanques: 3
- Frequência de brassagem: 1 a 3 vezes por dia

Definido pela Equação 4:

$$\frac{150L}{dia}(P1) + \frac{150L}{dia}(P2) + \frac{600L}{dia}(P3) = \frac{900L(H_2O)}{brassagem*dia} \quad (4)$$

sendo:

P1: tanque de mosturação

P2: tanque de clarificação do mosto

P3: tanque de fervura do mosto

Tendo em vista que o funcionamento da cervejaria é de cerca de 25 dias por mês, obtiveram-se um mínimo e um máximo uso de água mensal, que variam de acordo com a frequência diária de brassagens. Obteve-se assim o intervalo de consumo de água entre 22.500 a 67.500 L/mês, conforme demonstra a Equação 5:

$$\frac{900L}{brassagem.dia} . 25dias . (1 a 3 brassagem) = \frac{22.500 a 67.500L(H_2O)}{mês} \quad (5)$$

b) Lavagem Bruta

- N° de tanques: 2, pois é realizado o reuso dessa solução entre os tanques P1 e P2.
- Frequência de brassagens: 1 por semana

Definido pela Equação 6:

$$\frac{320L (H_2O)}{semana} + \frac{1,8L (soda caustica)}{semana} + \frac{0,18L (peracetico)}{semana} \quad (6)$$

Considerando então 4 semanas, obtém-se a Equação 7:

$$\left(\frac{1280L (H_2O)}{mês} + \frac{7,2L (soda caustica)}{mês} + \frac{0,72L (peracetico)}{mês} \right) . 2 (tanques) =$$
$$\left(\frac{2560L (H_2O)}{mês} + \frac{14,4L (soda caustica)}{mês} + \frac{1,44L (peracetico)}{mês} \right) \quad (7)$$

Assim, com o somatório dos itens da lavagem rápida e bruta pra mosturadores, obteve-se o consumo aproximado de água entre 25.000 a 70.000L H₂O/mês.

Fermentadores

c) Lavagem Bruta

- N° de tanques: 10
- Frequência de brassagem: 1 por mês

Determinado pela Equação 8:

$$\left(\frac{470L (H_2O)}{mês} + \frac{1,8L (soda caustica)}{mês} + \frac{0,18L (peracetico)}{mês} \right) . 10 (tanques) =$$
$$\left(\frac{4.700L (H_2O)}{mês} + \frac{18L (soda caustica)}{mês} + \frac{1,8L (peracetico)}{mês} \right) \quad (8)$$

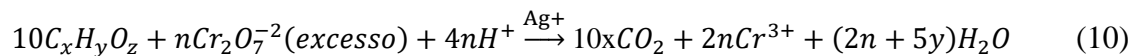
Por fim, somando o resultado envolvendo os mosturadores (item a) e fermentadores (item b), obtém-se um consumo volumétrico mensal de 29.760 a 74.760 litros de H₂O, 32,4 litros de soda cáustica e 3,24 litros de ácido peracético conforme a Equação 9:

$$\left(\frac{29.760L \text{ a } 74.760L (H_2O)}{\text{mês}} + \frac{32,4L (soda \text{ caustica})}{\text{mês}} + \frac{3,24L (peracetico)}{\text{mês}} \right) \quad (9)$$

3.1.2. Seleção de parâmetros na cervejaria

O DFA requer a definição de um ou mais parâmetros, eleitos para identificação das possibilidades de reuso em uma planta. Para a cervejaria local foi selecionado como parâmetro de controle das águas residuárias a demanda química de oxigênio (DQO) da água de lavagem dos tanques fermentadores. A escolha deste parâmetro baseia-se na literatura e revisão bibliográfica, onde este foi apresentado como um parâmetro referência ao se tratar de redes de água industriais e DFA, a saber, nos estudos de Tokos e Pintaric (2009) e Mirre (2012). Além disso, dentre as várias técnicas utilizadas para avaliar o potencial poluente de um resíduo, pode ser dado destaque à demanda química de oxigênio (DQO), pois reflete grande parte da matéria orgânica presente na matriz e aparece em legislações ambientais do mundo (ZAMORA E CORDEIRO, 2005).

Como a medida direta da demanda química de oxigênio é uma impossibilidade prática, o mesmo é convencionalmente substituído por substâncias químicas oxidantes que permitem avaliar o poder consumidor de oxigênio das mesmas. Destes oxidantes, o dicromato tem sido o mais empregado na determinação em águas e efluentes com reações que podem ser compreendidas conforme a Equação 10 convencional:

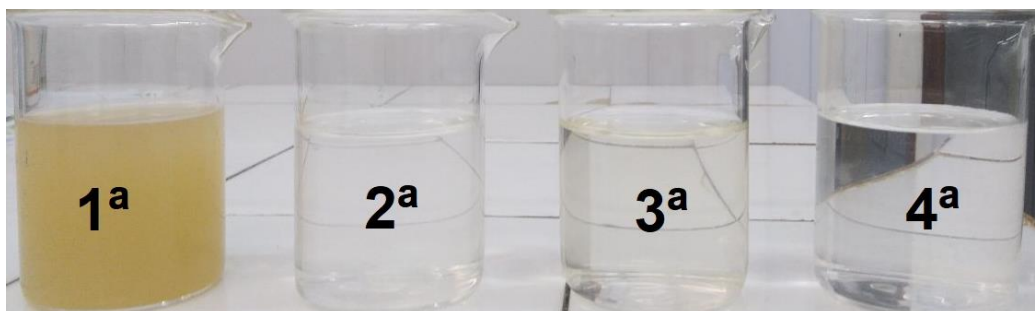


A análise deste parâmetro no presente trabalho teve fundamentação no método de Espectrofotometria de Absorção Molecular na região do ultravioleta-visível (EAM/UV-VIS) disposto em (IUPAC, 1988), realizada no Espectrofotômetro EEQ-9023 do Laboratório de Química Analítica Ambiental (LQAA) da Universidade Federal de Sergipe. A EAM/UV-VIS é uma técnica analítica empregada há mais de 50 anos para determinação quantitativa e

identificação de espécies moleculares orgânicas em diferentes tipos de materiais (NASCIMENTO *et al.*, 2010). Este método mede a absorção da radiação UV em sua passagem através de gases, líquidos ou sólidos, onde o comprimento de onda geralmente utilizado é de 190 a 1000 nanômetros (IUPAC, 1988).

As amostras foram coletadas em diferentes estágios da limpeza de um tanque de fermentação, identificadas na Figura 9, e os valores de DQO obtidos estão organizados na Tabela 4.

Figura 9- Amostras coletadas na cervejaria provenientes das etapas de limpeza do tanque de fermentação.



Fonte: O autor (2019)

Tabela 4- Valores de DQO de amostras do efluente de limpeza de um tanque fermentador da cervejaria.

Amostras	DQO (mg O ₂ /L)	Informações de Coleta
1ª amostra	7650,6	Resíduo orgânico da fermentação antes da ação da soda
2ª amostra	260,1	Solução de 60 L água e 1,8 L de soda (tempo de ação: 1min)
3ª amostra	320,1	Solução de 60 L água e 1,8 L de soda (tempo de ação: 15min)
4ª amostra	158,8	Solução de 60 L água e 1,8 L de soda (tempo de ação: 30min)

Fonte: O autor (2019)

Por fim, através dos resultados obtidos, foi possível construir a tabela de oportunidades (Tabela 5), que contempla os dados necessários para a implementação do DFA e sua rotina de cálculos direcionados às operações de limpeza no fermentador.

Tabela 5- Tabela de Oportunidades do presente estudo

Operação	Concentração máxima de entrada (mg/L)	Concentração máxima de saída (mg/L)	Volume do Tanque (L)	Tempo da Operação (min)	Vazão Mássica Limite (kg/h)
P1 (Fermentador 1)	0,0	7000,0	1150	10	48,3
P2 (Fermentador 1)	100,0	300,0	1150	40	0,5

Fonte: O autor (2019)

3.2. Implementação da Rotina de Cálculos do DFA no Mathcad

A fim de facilitar a execução de cálculos, foram criadas rotinas no *software* Mathcad Prime 3.1 com as ferramentas de programação embutidas do programa. Foram obtidas duas estruturas: uma para quando não houver reuso no DFA e outra quando este for necessário.

Os dados empregados foram extraídos dos trabalhos de Tokos e Pintaric (2009) e Mirre (2012), com intuito de verificar a aplicabilidade do *software* na execução do DFA. A partir de tais dados foi elaborada a tabela de oportunidades, a qual contém todas as informações necessárias à aplicação do procedimento, ou seja, às equações inclusas na rotina de cálculos.

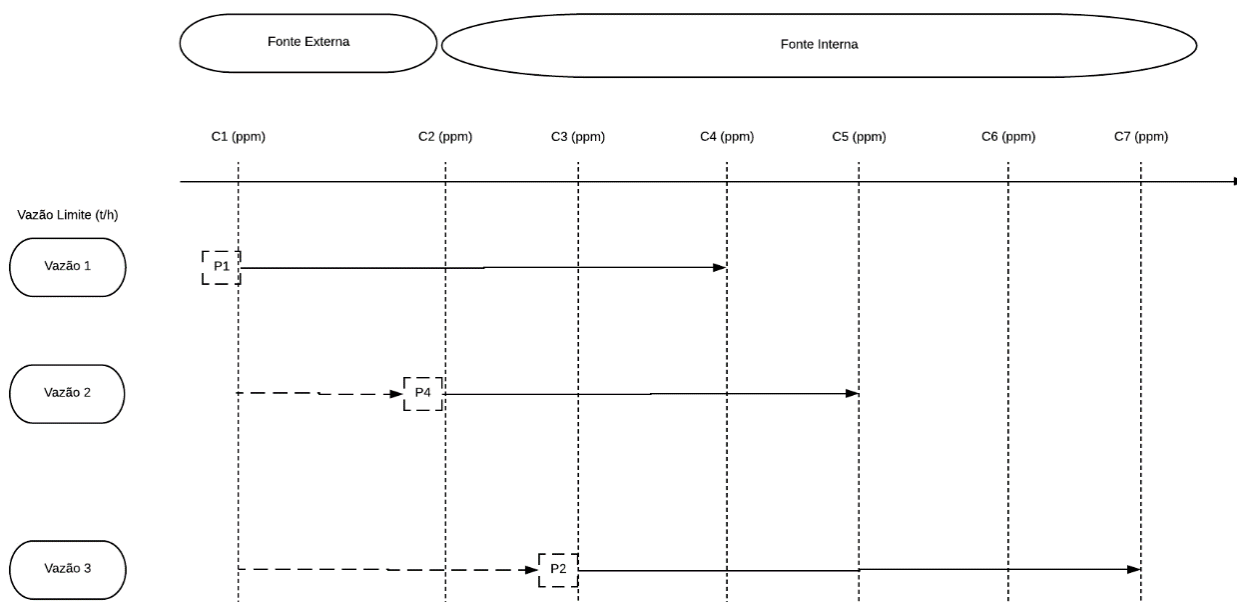
A tabela de oportunidades deve, impreterivelmente, conter as seguintes variáveis: vazão mássica limite do (s) contaminante (s); concentração máxima de entrada, concentração máxima de saída, conforme está estruturado na Tabela 6. Ressalta-se que, de acordo com a necessidade e objetivos do estudo, pode ser avaliada a vazão mássica de mais de um contaminante (multicontaminantes). Entretanto, esta tarefa exige um esforço matemático elevado e que seria de complexidade inviável para o presente trabalho. Esses valores foram, então, acrescentados à estrutura do diagrama de fontes de água, conforme ilustra a Figura 10, onde P indica a operação, C indica a concentração de contaminante (ppm) e há a vazão mássica limite em toneladas por hora (t/h).

Tabela 6- Tabela de oportunidades utilizada como referência para a criação da rotina no Mathcad.

Operações	Concentração máxima de entrada (ppm)	Concentração máxima de saída (ppm)	Vazão Mássica Limite (t/h)
1	24,3	425,0	41,0
2	100,0	299,0	26,1
3	100,0	980,0	47,2
4	100,0	330,0	46,2
5	24,3	56,0	46,9
6	100,0	329,0	115,3

Fonte: Adaptado de Tokos e Pintaric (2009) *apud* Mirre (2012).

Figura 10- Representação de uma estrutura básica do DFA.



Fonte: O autor (2018)

Após elaboração da estrutura do DFA, dá-se a resolução das equações. Deve-se, inicialmente, calcular a carga de contaminante de cada operação a ser obtida empregando-se a Equação 11.

$$\Delta m_{kj} = f_{Lk} \cdot (C_{fi} - C_{ij}) \quad (11)$$

onde,

Δm_{kj} (kg/h): carga de contaminante transferida na operação k , no intervalo j ;

f_{Lk} (t/h): vazão limite da operação k ;

C_{fi} (ppm): concentração final do intervalo j ;

C_{ij} (ppm): concentração inicial do intervalo j .

Em seguida, deve-se calcular a vazão da fonte necessária para remover toda a carga transferida através da Equação 12.

$$f_{pkj} = \frac{\Delta m_{kj}}{C_{fj} - C_p} \quad (12)$$

onde,

f_{pkj} (t/h): vazão da fonte externa ou interna p necessária para a remoção do contaminante na operação k , no intervalo j ;

Δm_{kj} (kg/h): carga de contaminante transferida na operação k , no intervalo j ;

C_{fi} (ppm): concentração final do intervalo j ;

C_p (ppm): concentração da fonte externa ou interna.

Quando a vazão anterior não for suficiente para remover todo o contaminante do intervalo, se faz necessária a adição de uma nova corrente de água. Esta vazão complementar é calculada pela Equação 13.

$$f_{pkj}^e = \frac{\Delta m_{kj} - \sum_{a=1}^N [f_{akj} \cdot (C_{fj} - C_{aj})]}{C_{fj} - C_p^e} \quad (13)$$

onde,

f_{pkj}^e (t/h): vazão da fonte externa ou interna p necessária para a remoção do contaminante na operação k , no intervalo j , utilizando fonte externa e ;

f_{akj} (t/h): vazão necessária para remoção do contaminante quando há utilização de fonte interna na operação k , no intervalo j ;

C_{aj} : concentração com a qual a fonte interna a é utilizada no intervalo j ;

C_{fi} (ppm): concentração final do intervalo j ;

C_p^e (ppm): concentração da fonte externa e .

De posse das três equações supracitadas, criou-se uma rotina de cálculos autônoma, tornando o procedimento de cálculos relativamente ágil quando comparado à realização manual ou ferramentas computacionais como o Excel, fazendo-se necessário pelo usuário, apenas, a alimentação do programa com as variáveis iniciais das equações singulares para cada estudo caso. As três equações são resolvidas a cada novo intervalo de concentração (ppm).

Vale ressaltar que a rotina de cálculo desenvolvida no presente projeto permite a análise de, no máximo, quatro intervalos. Entretanto, o número de operações do cenário não possui um limite definido, possibilitando ao usuário impor a quantidade de operações que desejar.

Assim, quando todos os intervalos forem percorridos, encerrar-se-á uma operação. O procedimento é refeito até que todas as operações do cenário sejam concluídas. Contudo, a ordem das operações deve, em qualquer hipótese, obedecer às regras heurísticas.

3.2.1. O Cenário “Sem Reuso”

O cenário Sem Reuso é na verdade, a representação da situação crítica ou de máximo consumo de água em uma indústria, sendo o pior dos cenários, visto que, nesta hipótese, não há nenhum tipo de integração de processos ou reuso das águas residuais resultante das operações unitárias. A simulação deste caso é de extrema importância, pois serve como um cenário base para a posterior aplicação de reuso das correntes.

As Equações 11, 12 e 13 foram adaptadas e reformuladas no Mathcad e obtiveram-se as seguintes Equações 14 a 19 para o Programa Sem Reuso:

$$Ccl_i = Qlim. (C2 - C1) \quad (14)$$

onde,

Ccl_i (kg/h): representa a carga de contaminante limite do intervalo;

$Qlim$ (t/h): vazão limite da operação;

$C1$ (ppm): concentração de entrada do intervalo;

$C2$ (ppm): concentração de saída do intervalo.

$$Vf_i = \frac{Ccl_i}{C2 - Ce} \quad (15)$$

onde,

Vf_i (t/h): vazão do Efluente necessária para remover a Concentração de Contaminante (Ccl_i) do intervalo;

Ccl_i (kg/h): representa a carga de contaminante limite do intervalo;

$C2$ (ppm): concentração de saída do intervalo;

Ce (ppm): concentração da fonte externa (água fresca adicionada no início da operação).

$$cc_i = \frac{Vf_i}{1000} \cdot (C2 - Ce) \quad (16)$$

onde,

cc_i (ppm): concentração de contaminante que o efluente possui;

Vf_i (t/h): vazão do Efluente necessária para limpar a Concentração de Contaminante (Ccl_i) do intervalo;

$C2$ (ppm): concentração de saída do intervalo;

Ce (ppm): concentração da fonte externa (água fresca adicionada no início da operação).

$$ccl_i = \frac{Ccl_i}{1000} \quad (17)$$

onde,

ccl_i (ppm): concentração de contaminante limite que o intervalo suporta;

Ccl_i (kg/h): representa a carga de contaminante limite do intervalo.

$$Dcc_i = ccl_i - cc_i \quad (18)$$

onde,

Dcc_i (ppm): variação das concentrações de contaminante limite pela que o intervalo suporta;

ccl_i (ppm): concentração de contaminante limite que o intervalo suporta;

cc_i (ppm): concentração de contaminante que o efluente possui.

$$R_i = Dcc_i \cdot \frac{1000}{C2 - Ce} \quad (19)$$

onde,

R_i (t/h): representa a Vazão que deve ser adicionada no próximo intervalo;

Dcc_i (ppm): variação das concentrações de contaminante limite pela que o intervalo suporta;

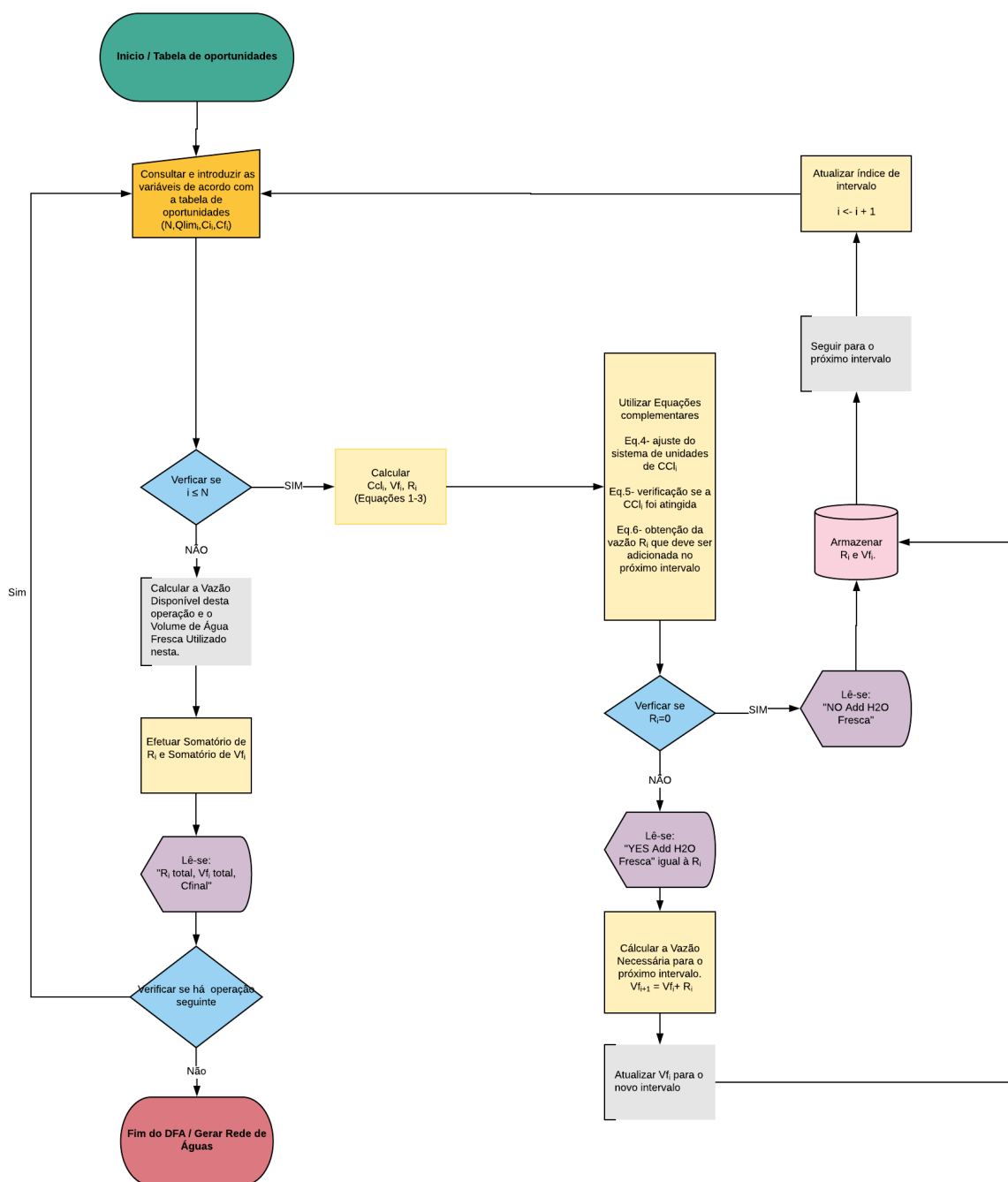
$C2$ (ppm): concentração de saída do intervalo;

Ce (ppm): concentração da fonte externa (água fresca adicionada no início da operação).

Tendo em vista que o entendimento do código fonte do *software* não é intuitivo ao usuário, buscou-se facilitar a compreensão do que foi programado através de um fluxograma, a exemplo de um roteiro simplificado, a fim de guiar o usuário. A proposta deste é que o usuário preencha corretamente as variáveis de entrada. Uma vez atendida, os cálculos são executados automaticamente, cabendo apenas ao usuário à interpretação dos resultados. Assim, foi construído um fluxograma de execução do DFA para o caso sem reuso, conforme a Figura 11.

Partindo-se do fluxograma exposto na Figura 11, apresenta-se o código fonte do programa, através de capturas de tela da interface do Mathcad (APÊNDICE 1). Nesta destaca-se ao final, nas duas últimas linhas, as variáveis de saída e suas respectivas unidades em *return*. Da mesma forma, observa-se o código fonte e as variáveis de saída do programa para operações com 3 intervalos, nas últimas três linhas do APÊNDICE 2, e para operações com 4 intervalos nas últimas quatro linhas do APÊNDICE 3.

Figura 11- Fluxograma para execução do Programa Sem Reuso no MATHCAD.



Legenda

N: Número de intervalos
i: Contador dos intervalos nas variáveis
 Q_{lim_i} (ton/h): Vazão limite da operação
 C_{i_i} (ppm): Concentração inicial do intervalo
 C_{f_i} (ppm): Concentração final do intervalo
 $C_{c_{i_i}}$ (kg/h): Carga de contaminante limite do intervalo
 V_{f_i} (ton/h): Vazão necessária para limpar a carga de contaminante
 R_i (ton/h): Vazão de Efluente ou Água Tratada, que deve ser adicionada no próximo intervalo

Fonte: O autor (2018).

Como dito anteriormente, o programa permite analisar uma dada operação industrial com até 4 intervalos de concentração para um componente e que a rotina de cálculos a ser utilizada depende da quantidade de intervalos de interesse do usuário (disponível na tabela de oportunidades, Tabela 5). Desta forma, faz-se necessário identificar preliminarmente a quantidade de intervalos (N) de cada operação e assim utilizar o código fonte específico para a mesma. Nota-se, contudo, que as estruturas dos programas são similares, diferenciando-se apenas no fim do código, com cálculos suplementares e referentes à quantidade de intervalos, como pode ser visto no destaque em vermelho no APÊNDICE 3

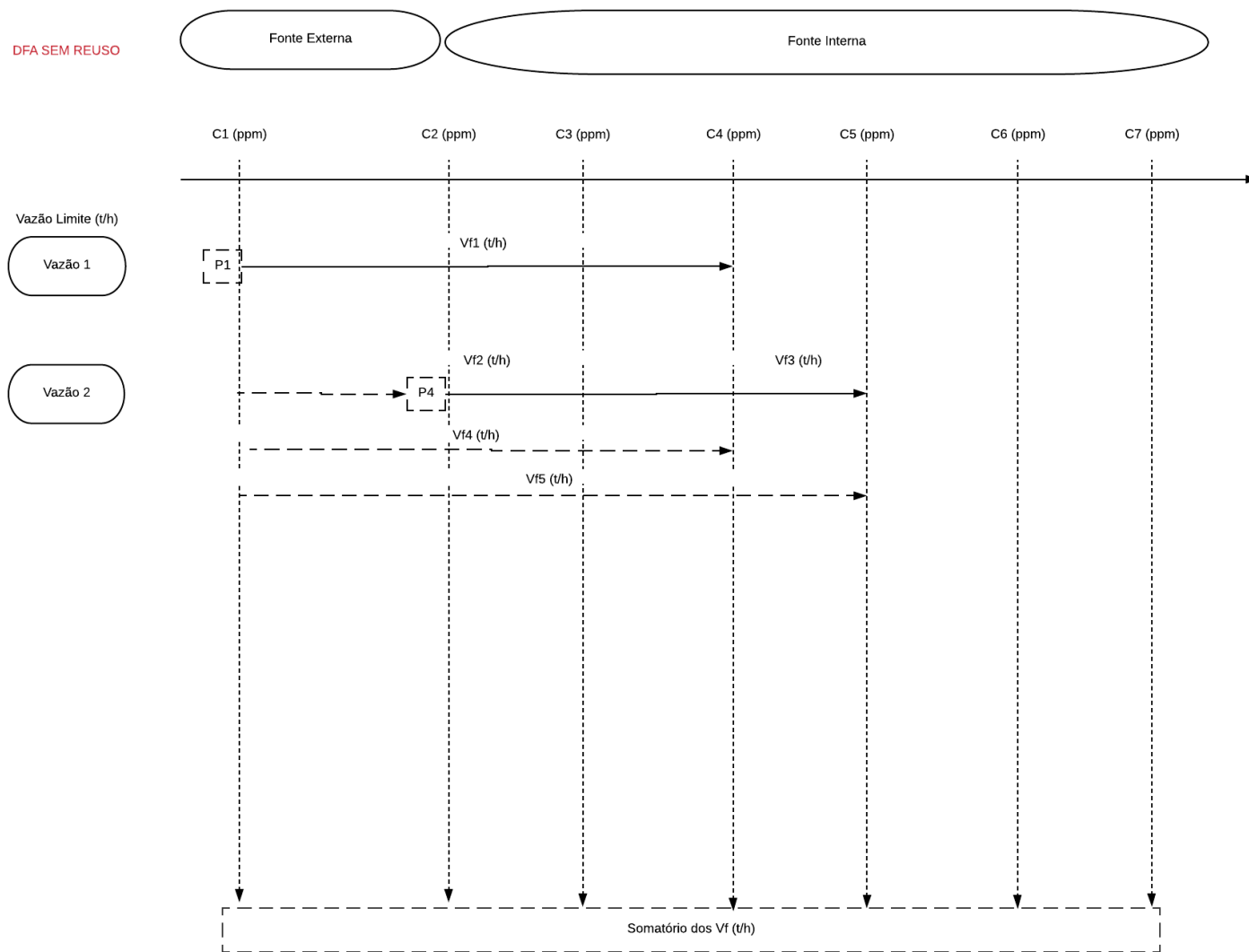
De posse dos valores de saída, cabe ao usuário a criação gráfica do efetivo Diagrama de Fonte de Águas (DFA), ilustrado na Figura 12, cuja elaboração ainda que seja impossibilitada no Mathcad é simples em aplicativos gratuitos disponíveis na Internet. A importância da criação dessa estrutura reside na facilidade de visualização dos fluxos de água e concentrações de contaminantes das operações de um cenário, contemplados seus valores, inclusive, obtidos nas saídas dos programas.

A literatura relata ainda uma forma mais objetiva de visualizar os fluxos finais e as etapas de mistura (M) ou divisão de correntes (D) após a elaboração do Diagrama de Fontes de Água: por meio de uma Rede de Águas. Esta compreende a última etapa do estudo, na qual são reportados apenas valores de interesse do usuário, de operação para outra.

A Figura 13 ilustra uma configuração típica, na qual pode ser notada, inicialmente, a adição de uma corrente total neste cenário industrial, a qual pode visualizada antes da divisão de correntes (D) e com uma concentração de contaminante próxima a zero, evidenciando com base neste parâmetro, ser uma fonte externa de água fresca, ou seja, de boa qualidade. O fluxo inicial foi dividido para atender à vazão demandada em cada operação, na qual sabe-se que a concentração de contaminante desta deve ser menor que a inicial permitida por cada operação.

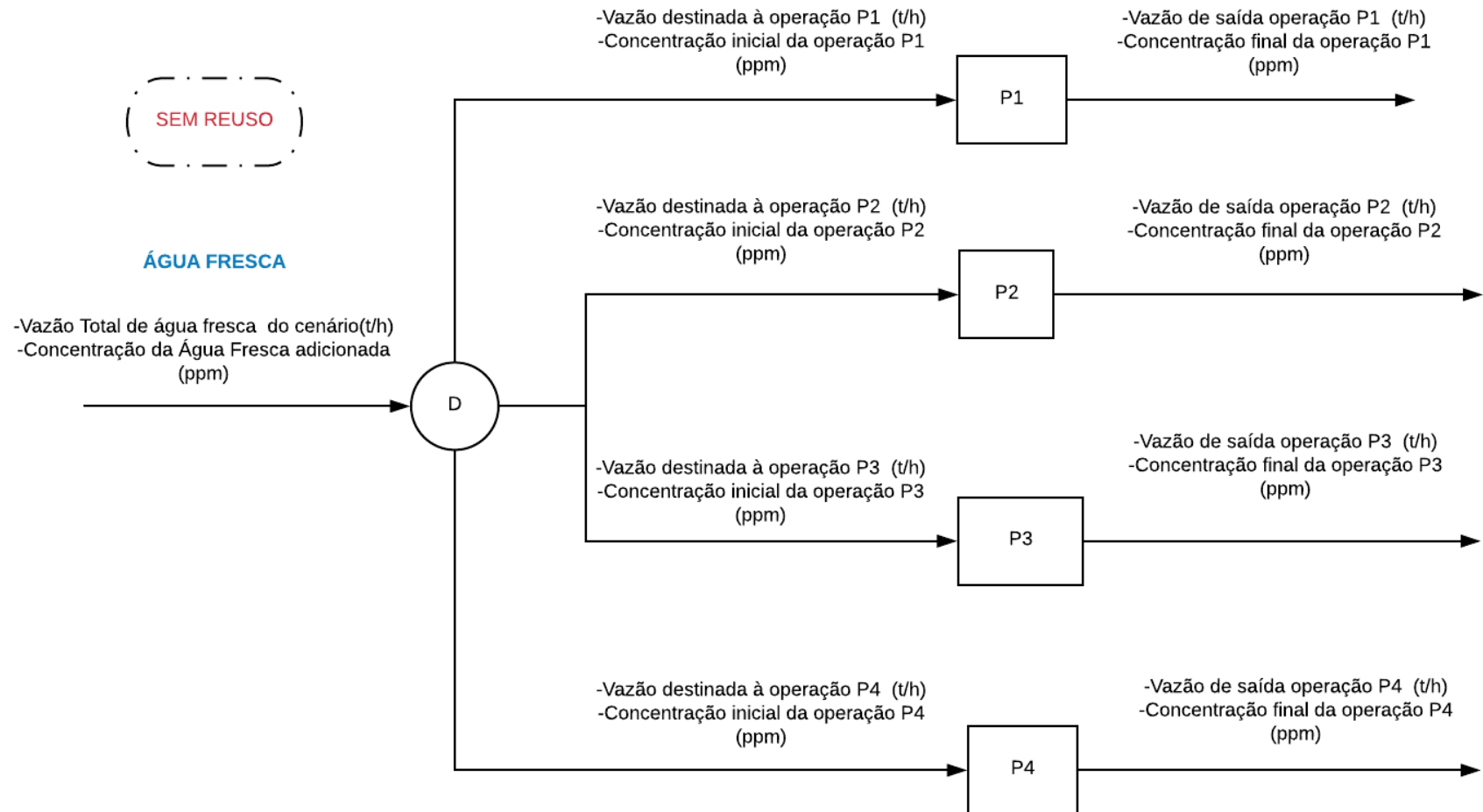
Entretanto, não necessariamente obriga-se que a concentração de um dado contaminante na água seja zero, pelo contrário, é frequentemente superior a zero, caracterizando daí a oportunidade de ser aplicado o reuso. Desta forma, reiteram-se as evidentes oportunidades de reuso da água em processos industriais, visto que a vazão de saída de uma operação (exemplo, de um dado equipamento) pode ser suficiente para a demandada inicialmente por outra, e assim racionaliza-se o recurso hídrico.

Figura 12- Cenário do Diagrama de Fontes de Água Sem Reuso para 4 intervalos.



Fonte: O autor (2018).

Figura 13- Configuração de uma rede de água Sem Reuso onde há divisão de correntes, representada por D.



Fonte: O autor (2018)

3.2.2. Programa Com Reuso e a validação da rotina aplicada a uma cervejaria

Uma vez estruturada a rede de águas sem reuso, faz-se necessário avaliar as oportunidades de integração de processos para reuso de águas, a fim de obter um melhor aproveitamento do recurso. Ressalta-se que, para criação de rotas de reuso, as regras heurísticas devem ser seguidas e que o esforço de criação destes vários cenários será minimizado através da execução da rotina do programa com reuso. A estrutura e as equações do programa com reuso são similares às do sem reuso, entretanto, o código fonte sofreu modificações e foi ajustado para calcular corretamente o volume de água requerido quando houver reuso entre os fluxos de água das operações.

Neste programa inserem-se às equações 20, 21 e 22, que foram adaptadas no Mathcad Assim, obtiveram-se:

$$Ccl_i = Qlim . (Cs_i - Ce_i) \quad (20)$$

onde,

Ccl_i (kg/h): carga de contaminante limite do intervalo;

$Qlim$ (t/h): vazão limite da operação;

Ce_i (ppm): concentração de entrada do intervalo;

Cs_i (ppm): concentração de saída do intervalo.

$$Ccex_i = \frac{(Vfex_i + Vfex_{i+1}) . (Cs_i - Ce_i)}{1000} \quad (21)$$

onde,

$Ccex_i$ (kg/h): carga de contaminante limite da(s) fonte externa(s);

$Vfex_i$ (t/h): vazão adicionada da(s) fonte externa(s) em cada intervalo;

Ce_i (ppm): concentração de entrada do intervalo;

Cs_i (ppm): concentração de saída do intervalo.

$$Vf_i = \left(\frac{Cc_i - Ccex_i}{Cs_i - Cf_i} \right) \cdot 1000 \quad (22)$$

onde,

Vf_i (t/h): vazão necessária para limpar a carga de contaminante;

Cc_i (kg/h): carga de contaminante limite do intervalo;

$Ccex_i$ (kg/h): carga de contaminante limite da (s) fonte externa (s);

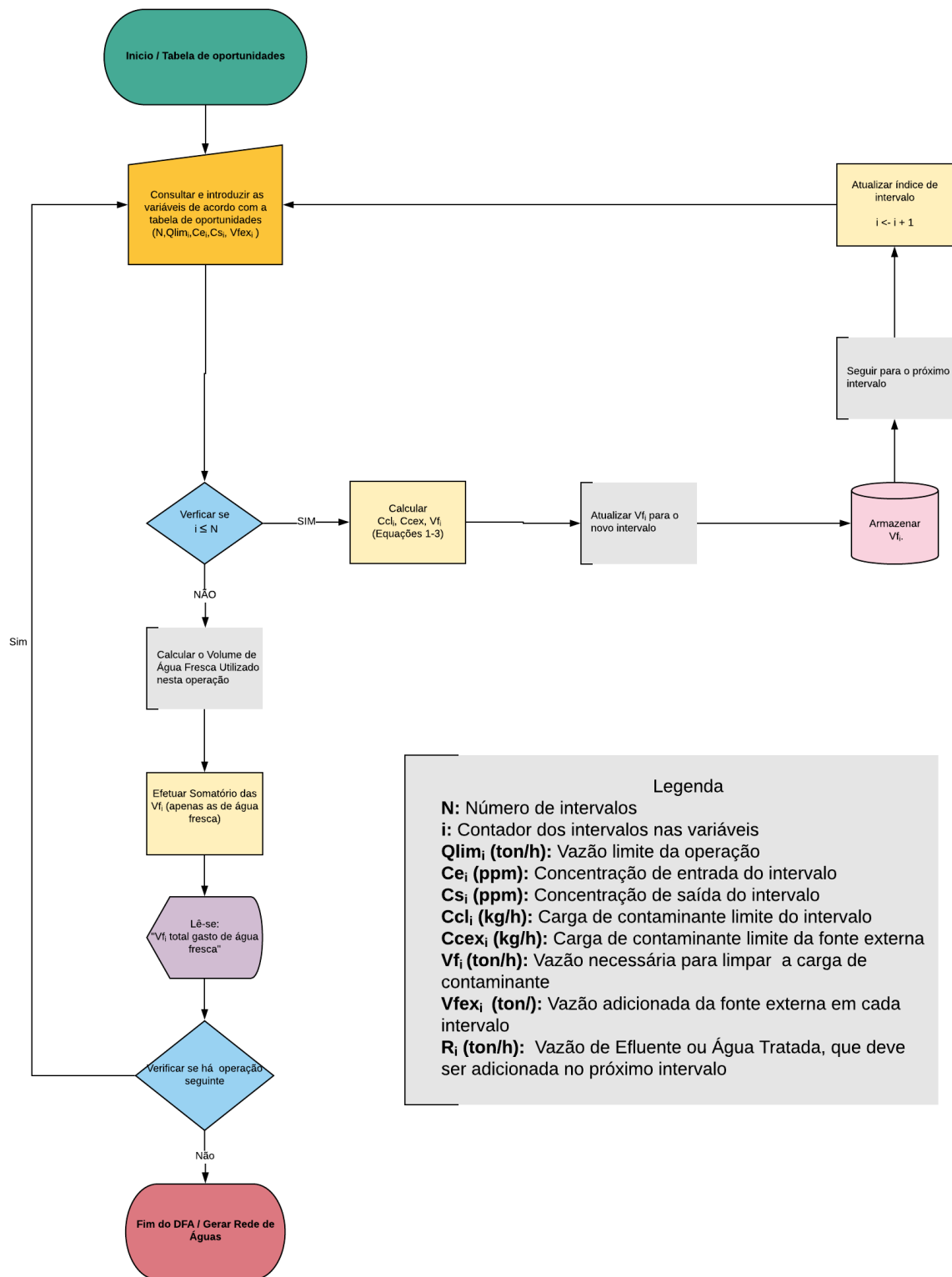
Ce_i (ppm): concentração de entrada do intervalo;

Cs_i (ppm): concentração de saída do intervalo.

Da mesma forma, neste caso, objetivando-se o reuso de água entre as operações, seguiram-se a elaboração da rotina no Mathcad, do fluxograma guia e dos códigos fontes. Assim sendo, apresenta-se o fluxograma para execução do programa Com Reuso na Figura 14.

As diferenças entre as informações presentes na Figura 11 e APÊNDICE 4 estão na quantidade de variáveis que serão introduzidas inicialmente e as que serão obtidas após os cálculos. Semelhantes às do programa “sem reuso”, as equações foram reorganizadas para atender a integração de processos e o reuso d’água entre as operações. Ressalta-se que no DFA Com Reuso existe um novo fluxo de água com concentração de contaminante (ppm) superior à da água fresca (subentendida ausente de contaminantes), tendo efeito sobre a obediência das regras heurísticas. Portanto, para atender essas novas considerações, variáveis foram acrescentadas, a exemplo de “ $Vfex$ ” que representa a vazão adicionada de fonte externa em cada intervalo. Assim, o resultado esperado pelo cálculo Com Reuso, ilustrado no APÊNDICE 4, APÊNDICE 5 e APÊNDICE 6 é mais detalhado e apresenta novas informações, a fim de identificar a oportunidade com máximo aproveitamento d’água dentre os diversos cenários que serão propostos.

Figura 14- Fluxograma para execução do Programa Com Reuso no MATHCAD.

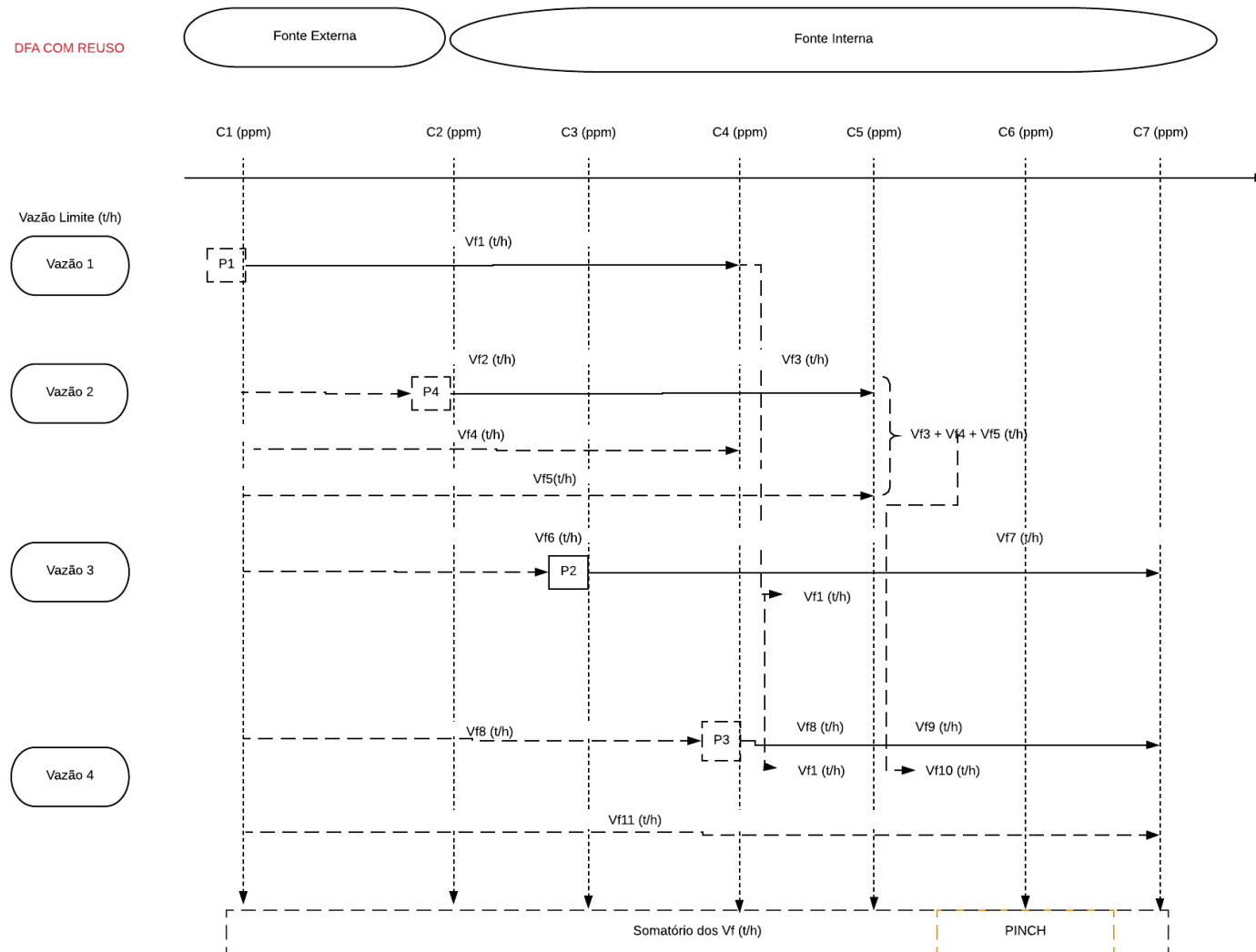


Fonte: O autor (2018).

Análogo ao caso Sem Reuso, o programa “com reuso” permite analisar operações industriais com até 4 intervalos de concentração para um contaminante. Com as variáveis obtidas através do *return* do código fonte, cabe ao usuário à criação gráfica tanto do Diagrama de Fonte de Águas, ilustrado na Figura 15, quanto da Rede de Águas (Figura 16).

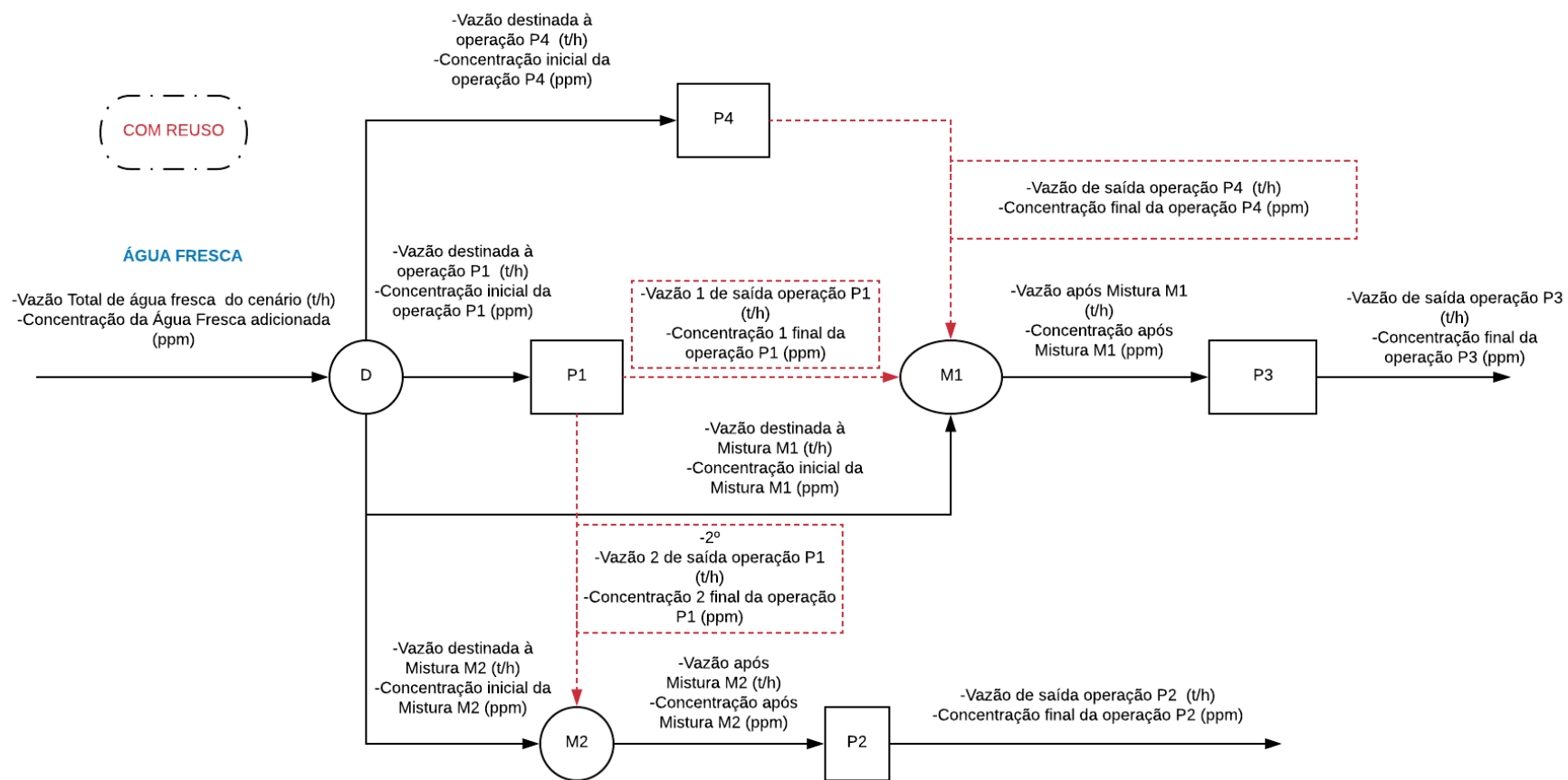
Deste modo, buscando-se validar a rotina construída para o presente estudo, foram empregados no Mathcad os dados de Mirre (2012), também oriundo de um empreendimento cervejeiro.

Figura 15- Possibilidade de fluxograma para um cenário do DFA Com Reuso.



Fonte: O autor (2018).

Figura 16- Rede de Água com máximo reuso.



Fonte: O autor (2018).

3.3. Avaliação Econômica

A metodologia de avaliação teve como base o estudo de Tokos e Pintaric (2009), onde os cenários promissores foram analisados quanto à viabilidade técnica e econômica de sua implantação, envolvendo a determinação de custos de investimento que incorporam: o custo fixo; o capital de giro; a partida da planta; a depreciação anual do custo de capital de 10%.

Para fins de cálculos, foi utilizada a correlação para tanques com ordem de grandeza de dezenas de toneladas e com material de aço inoxidável, conforme a seguinte Equação 23:

$$C_t = 397,3 \cdot Q^{0.7} \quad (23)$$

onde,

C_t (US\$): custo do tanque;

Q (toneladas): capacidade de estocagem do tanque.

A cervejaria em estudo possui tanques de menor ordem de grandeza volumétrica do que o recomendado pela correlação utilizada, variando entre as capacidades mínima de 600 litros e máxima de 2.300 litros. Portanto, ao não atender esta recomendação, inferiu-se ser mais apropriado a análise do custo dos tanques de acordo com o preço de mercado fornecido pelo fabricante nacional ao invés do uso da equação supracitada.

Uma vez calculado o custo do tanque, analisou-se o tempo de duração da operação, a fim de se estimar o custo anual. Por fim, para ilustrar os novos cenários e contemplar as alterações necessárias, o presente trabalho elaborou diagramas ilustrativos com auxílio do aplicativo *LUCIDCHART*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Validação da Rotina

Como citado, para a validação da rotina construída empregou-se os dados de Mirre (2012), na qual foi possível obter uma redução de 11,25 t/h. A saber, os resultados obtidos pelo autor e no presente estudo seguem apresentados na Tabela 7. As rotinas estão detalhadas nos APÊNDICE 7 e APÊNDICE 8, nas quais os valores obtidos estão destacados em vermelho.

Tabela 7- Resultados do DFA aplicado a dois cenários em uma cervejaria em Mirre (2012).

Cenários	Consumo de água por batelada (t) (Mirre, 2012)	Consumo de água por batelada (t) (O autor, 2019)
1	55,75	55,75
2	44,50	44,50

Fonte: Adaptado de Mirre (2012)

4.2. Definição dos Cenários

Após validação das rotinas, foi possível aplicar o DFA simulando 3 situações de produção na cervejaria sergipana: mínima, intermediária e máxima. Os resultados de DQO obtidos em laboratório, conforme exposto anteriormente na Tabela 4, representam o cenário mínimo de produção com apenas um fermentador. Deste modo, para a criação do cenário máximo, foram realizadas estimativas numéricas para o contaminante DQO, a fim de estabelecer as variáveis dos tanques fermentadores para esta situação. Isto só foi possível em razão da indústria cervejeira utilizar matérias primas semelhantes (malte, cereais e lúpulo), mesmo que seja desejado obter diferentes tipos de cerveja. Assim, o efluente destas operações apresenta pouca variação quanto à concentração dos contaminantes internos. Tais estimativas

numéricas foram necessárias devido à intensa rotina de trabalho da cervejaria local, o que limitou a coleta das amostras à apenas um tanque fermentador. Por fim, elaborou-se a tabela de oportunidades adaptada para o cenário intermediário (Tabela 8), por ser o mais próximo da rotina da cervejaria local. A classificação dos cenários pode ser entendida da seguinte forma:

- Cenário mínimo de produção: 1 fermentador em operação
- Cenário intermediário de produção: 4 fermentadores em operação
- Cenário máximo de produção: 10 fermentadores em operação

Tabela 8- Tabela de oportunidades considerando um cenário intermediário de produção da cervejaria local

Operação	Concentração DQO máxima de entrada (mg/L)	Concentração DQO máxima de saída (mg/L)	Volume do Tanque (L)	Tempo da Operação (min)	Vazão Mássica Limite (kg/h)
P1 (Fermentador 1)	0	7000	1150	10	48,3
P2 (Fermentador 1)	100	300	1150	40	0,5
P3 (Fermentador 2)	0	7200	1150	10	49,7
P4 (Fermentador 2)	50	320	1150	40	0,5
P5 (Fermentador 3)	0	6800	600	10	24,5
P6 (Fermentador 3)	80	310	600	40	0,3
P7 (Fermentador 4)	0	7500	600	10	27,0
P8 (Fermentador 4)	50	290	600	40	0,3

Uma vez que os dados necessários foram tabulados, elaborou-se a base do diagrama de fontes de água no aplicativo *LUCIDCHART*, o qual pode ser visualizado na Figura 17. Em seguida, aplicaram-se os valores ao código fonte do Programa “Sem Reuso”, exposto no item 3.2.1. Assim, foram obtidos os resultados presentes na Figura 18 e, então, estruturado o DFA ilustrado na Figura 19.

Figura 17- DFA base para aplicação à cervejaria e geração de cenários

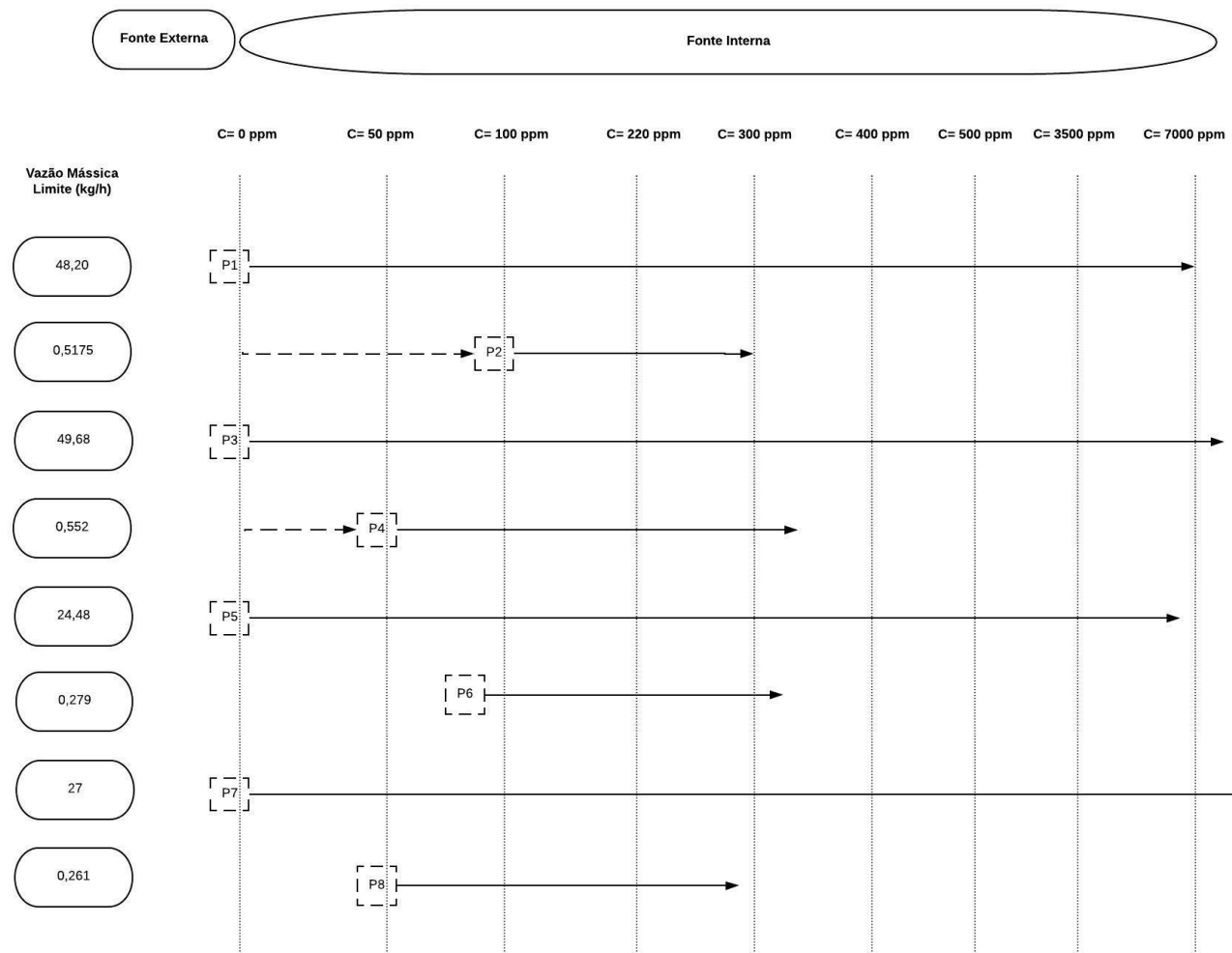


Figura 18- Resultados da aplicação ao programa do Mathcad Sem Reuso

Operação P1

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 8
Qlim: 0.0483 t/h
Cmax entrada: 0ppm
Cmax saída: 7000ppm

$$sr8(Qlim, Ce, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 2.415 & 0.048 & 0.048 & 7 \cdot 10^3 & 0.048 & 48.3 \\ 2.415 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 5.796 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 3.864 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 4.83 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 4.83 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 144.9 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 169.05 & 0.048 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P2

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 0.0005175 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 300 ppm

$$sr2(Qlim, Ce, C1, C2, C3) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.062 & 2.823 \cdot 10^{-4} & 3.45 \cdot 10^{-4} & 300 & 3.45 \cdot 10^{-4} & 0.345 \\ 0.041 & 2.823 \cdot 10^{-4} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P3

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 8
Qlim: 0.04968 t/h
Cmax entrada: 0 ppm
Cmax saída: 7200 ppm

$$sr8(Qlim, Ce, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 2.484 & 0.05 & 0.05 & 7.2 \cdot 10^3 & 0.05 & 49.68 \\ 2.484 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 5.962 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 3.974 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 4.968 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 4.968 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 149.04 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 183.816 & 0.05 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P4

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 3
Qlim: 0.000552 t/h
Cmax entrada: 50 ppm
Cmax saída: 320 ppm

$$sr3(Qlim, Ce, C1, C2, C3, C4) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.028 & 2.76 \cdot 10^{-4} & 4.658 \cdot 10^{-4} & 320 & 4.658 \cdot 10^{-4} & 0.466 \\ 0.066 & 2.76 \cdot 10^{-4} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 0.055 & 4.265 \cdot 10^{-4} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P5

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 8
Qlim: 0.02448 t/h
Cmax entrada: 0 ppm
Cmax saída: 6800 ppm

$$sr8(Qlim, Ce, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 1.224 & 0.024 & 0.024 & 6.8 \cdot 10^3 & 0.024 & 24.48 \\ 1.224 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.938 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 1.958 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.448 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.448 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 73.44 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 80.784 & 0.024 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P6

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 0.000279 t/h
Cmax entrada: 80 ppm
Cmax saída: 310 ppm

$$sr2(Qlim, Ce, C1, C2, C3) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.039 & 1.775 \cdot 10^{-4} & 2.07 \cdot 10^{-4} & 310 & 2.07 \cdot 10^{-4} & 0.207 \\ 0.025 & 1.775 \cdot 10^{-4} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Operação P7

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 8
Qlim: 0.027 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 7500 ppm

$$sr8(Qlim, Ce, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 1.35 & 0.027 & 0.027 & 7.5 \cdot 10^3 & 0.027 & 27 \\ 1.35 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 3.24 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.16 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.7 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 2.7 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 81 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \\ 108 & 0.027 & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

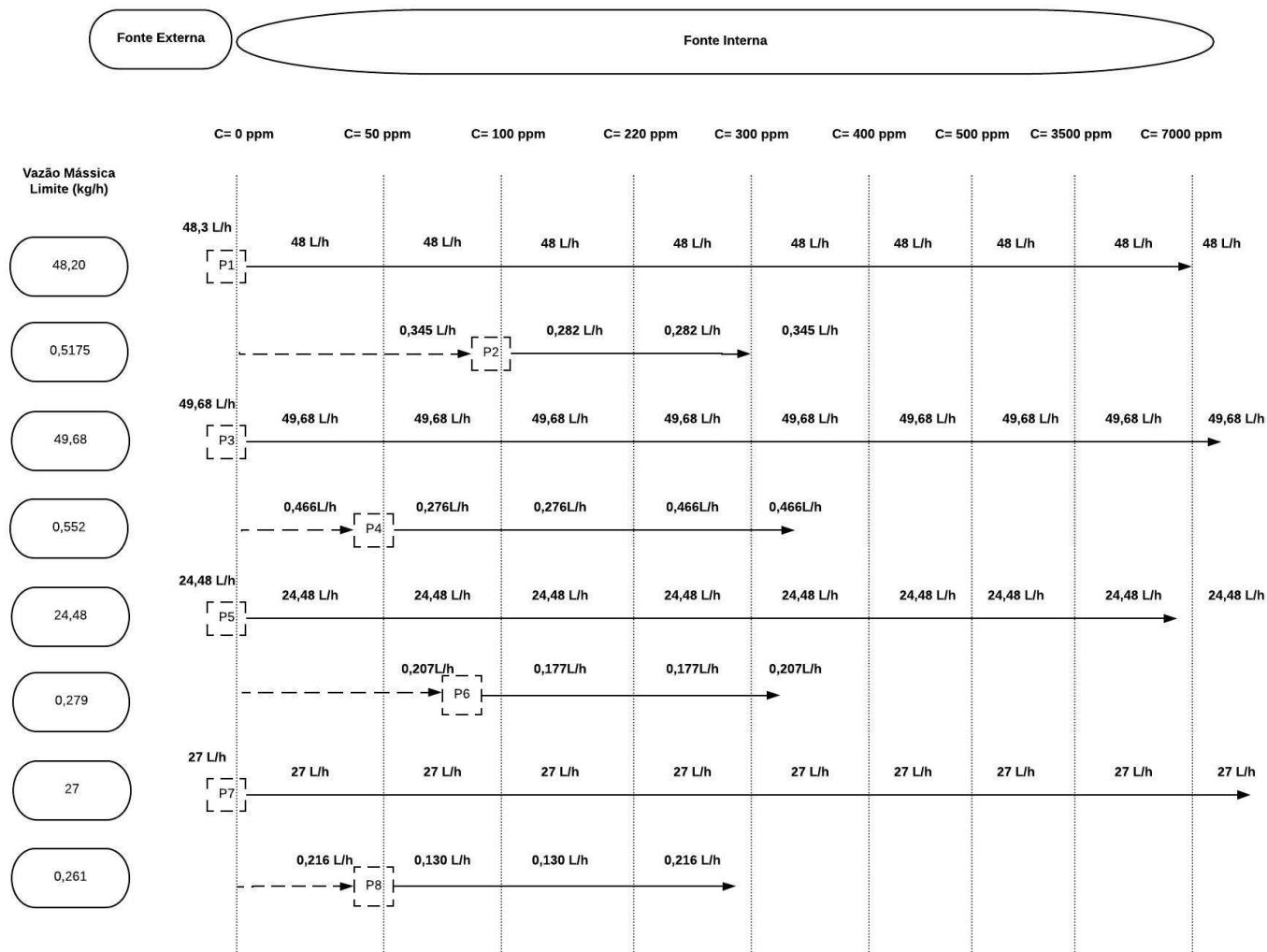
Operação P8

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 0.000261 t/h
Cmax entrada: 50 ppm
Cmax saída: 290 ppm

$$sr2(Qlim, Ce, C1, C2, C3) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.013 & 1.305 \cdot 10^{-4} & 2.16 \cdot 10^{-4} & 290 & 2.16 \cdot 10^{-4} & 0.216 \\ 0.05 & 1.305 \cdot 10^{-4} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} & \text{"--"} \end{bmatrix}$$

Somatório da "H2O Adicionada" = 150,7 L/h

Figura 19- DFA contendo os resultados obtidos pelo código do Programa Sem Reuso



Uma vez obtido o pior cenário de consumo construído, ou seja, o cenário Sem Reuso, vislumbrou-se o cenário Com Reuso e criou-se o DFA (Figura 20), propondo-se reuso entre as operações conforme indicado através das setas tracejadas em azul.

Logo, definido o trajeto de reuso das operações, é possível aplicar a vazão mássica limite (L/h) das correntes resultantes ao Programa Com Reuso e, por fim, apresentar os resultados, em vermelho (Figura 21).

Figura 20- DFA Com Reuso da cervejaria

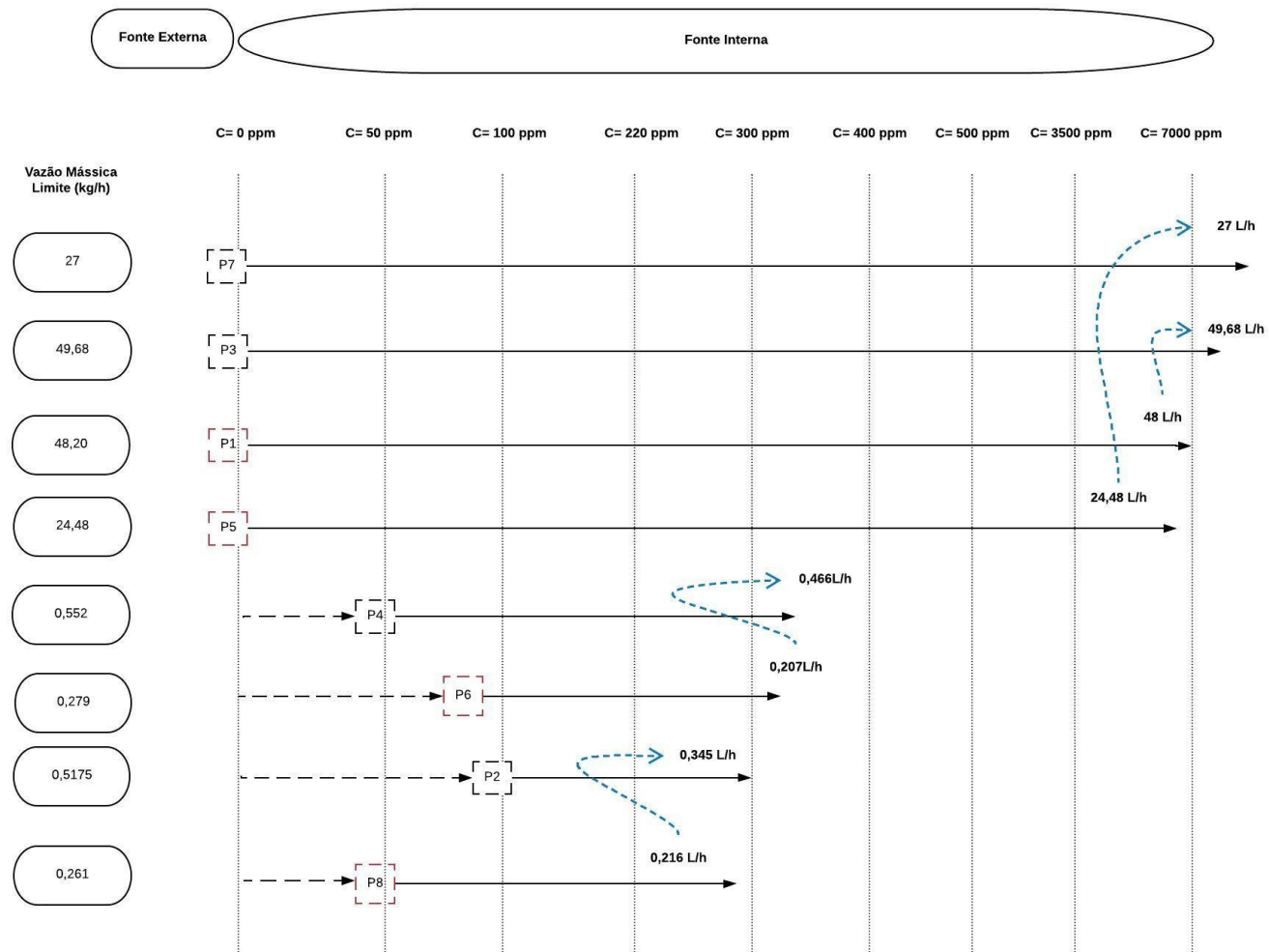


Figura 21- Resultados da aplicação ao programa do Mathcad Com Reuso

Operação P1		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 2.415 & 0.048 & 0.048 & 7 \cdot 10^3 & 0.048 & 48.3 \\ 2.415 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 5.796 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ sr8(0.0483, 0, 0, 50, 100, 220, 300, 400, 500, 3500, 7000) = & 3.864 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 4.83 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 4.83 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 144.9 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 169.05 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Sem Reuso N intervalos: 8 Qlim: 0.0483 t/h Cmax entrada: 0ppm Cmax saída: 7000ppm		
Operação P2		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"Vfex (ton/h)"} & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.062 & 2.823 \cdot 10^{-4} & 0 & 2.874 \cdot 10^{-4} & 0.287 \\ cr2(0.0005175, 100, 220, 220, 300, 0, 0.000216) = & 0.041 & 2.823 \cdot 10^{-4} & 2.16 \cdot 10^{-4} & \text{" "} \\ \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & 5.127 \cdot 10^{-6} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Com Reuso N intervalos: 2 Qlim: 0.0005175t/h Cmax entrada: 100 ppm Cmax saída: 300 ppm		
Operação P3		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"Vfex (ton/h)"} & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 2.484 & 0.05 & 0 & 0.005 & 4.827 \\ cr4(0.04968, 0, 100, 300, 500, 50, 220, 400, 7200, 0, 0, 0, 0.0482) = & 5.962 & 0.05 & 0 & \text{" "} \\ 4.968 & 0.05 & 0 & \text{" "} & \text{" "} \\ 332.856 & 0.05 & 0.048 & \text{" "} & \text{" "} \\ \text{" "} & -0.045 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Com Reuso N intervalos: 8 Qlim: 0.04968 t/h Cmax entrada: 0 ppm Cmax saída: 7200 ppm		
Operação P4		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"Vfex (ton/h)"} & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.028 & 2.76 \cdot 10^{-4} & 0 & -3.513 \cdot 10^{-4} & -0.351 \\ cr3(0.000552, 50, 100, 220, 100, 220, 320, 0, 0, 0.00207) = & 0.066 & 4.14 \cdot 10^{-4} & 0 & \text{" "} \\ 0.055 & 4.893 \cdot 10^{-4} & 0.002 & \text{" "} & \text{" "} \\ \text{" "} & -6.273 \cdot 10^{-4} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Com Reuso N intervalos: 3 Qlim: 0.000552t/h Cmax entrada: 50 ppm Cmax saída: 320 ppm		
Operação P5		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 1.224 & 0.024 & 0.024 & 6.8 \cdot 10^3 & 0.024 & 24.48 \\ 1.224 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 2.938 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ sr8(0.02448, 0, 0, 50, 100, 220, 300, 400, 500, 3500, 6800) = & 1.958 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 2.448 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 2.448 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 73.44 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \\ 80.784 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Sem Reuso N intervalos: 8 Qlim: 0.02448t/h Cmax entrada: 0 ppm Cmax saída: 6800 ppm		
Operação P6		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.039 & 1.775 \cdot 10^{-4} & 2.07 \cdot 10^{-4} & 310 & 2.07 \cdot 10^{-4} & 0.207 \\ sr2(0.000279, 0, 80, 220, 310) = & 0.025 & 1.775 \cdot 10^{-4} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Sem Reuso N intervalos: 2 Qlim: 0.000279t/h Cmax entrada: 80 ppm Cmax saída: 310 ppm		
Operação P7		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"Vfex (ton/h)"} & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 1.35 & 0.027 & 0 & 0.004 & 4.152 \\ cr4(0.027, 0, 100, 300, 500, 50, 220, 400, 7500, 0, 0, 0, 0.02448) = & 3.24 & 0.027 & 0 & \text{" "} \\ 2.7 & 0.027 & 0 & \text{" "} & \text{" "} \\ 189 & 0.027 & 0.024 & \text{" "} & \text{" "} \\ \text{" "} & -0.023 & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Com Reuso N intervalos: 8 Qlim: 0.027t/h Cmax entrada: 100 ppm Cmax saída: 7500 ppm		
Operação P8		$\begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)"} & \text{"Vf (ton/h)"} & \text{"vazao(t/h) disponivel"} & \text{"concentracao (ppm) de"} & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} & \text{"H2O (L/h) Adicionada"} \\ 0.013 & 1.305 \cdot 10^{-4} & 2.16 \cdot 10^{-4} & 290 & 2.16 \cdot 10^{-4} & 0.216 \\ sr2(0.000261, 0, 50, 100, 290) = & 0.05 & 1.305 \cdot 10^{-4} & \text{" "} & \text{" "} & \text{" "} \end{bmatrix}$
Reuso: Sem Reuso N intervalos: 2 Qlim: 0.000261t/h Cmax entrada: 50 ppm Cmax saída: 290 ppm		

Somatório da "H2O Adicionada" = 82,44 L/h



Conforme os destaques em vermelho na Figura 18 e Figura 21, entende-se que houve uma redução de aproximadamente 45,33% ou seja 68,26 L/h de água, um valor pouco expressivo para a cervejaria local, pois as operações de limpeza dos fermentadores acontecem apenas uma vez ao mês e com uma hora de duração, ou seja 68,26 L/mês. Ressalta-se, entretanto, que para indústrias cervejeiras de maior porte, esta redução tende a ser significativa em vista do maior volume consumido e frequência das operações.

4.3. Avaliação de Cenários Gerados pelo DFA - Técnico/Econômica

Inicialmente, foi possível estimar o custo financeiro dos componentes da limpeza, levando em consideração os volumes consumidos (item 3.1.1). Para a soda (Pluron 327 AS) o valor informado pelo fabricante foi de R\$ 16,50/L e, portanto, são gastos R\$ 534,60/mês. Já para o ácido peracético, o custo do produto comercializado é em média R\$ 45,00/L, totalizando R\$ 145,80/mês. Para estimar o custo financeiro mensal de água, baseou-se no quadro tarifário da companhia de saneamento de Sergipe e, portanto, de acordo com a DESO (2019) a tarifa é de R\$ 25,02/m³, ou seja, o consumo de água mensal nesta cervejaria varia entre R\$ 744,00 e R\$ 1.870,00 por mês.

Por fim, criou-se um esquema englobando as rotinas de limpeza dos tanques, estimativas dos consumos volumétricos e financeiros, conforme a Figura 22.

Figura 22- Rotina de lavagem dos tanques e consumo geral dos produtos de limpeza.

 <p>Mosturadores</p>	<p>-Mosturadores (3 unidades)</p> <p>-Volume da Lavagem "Rápida" (de 1 a 3 brassagens)</p> <p>Água: 22.500 a 67.500L/mês</p> <p>-Volume da Lavagem Bruta</p> <p>Água: 2.560 L/mês Soda: 14,4 L/mês Peracético: 1,44 L/mês</p>	<p>-Fermentadores (10 unidades)</p> <p>-Volume da Lavagem "Rápida" (Não há)</p> <p>Água: 0 L/mês</p> <p>-Volume da Lavagem Bruta</p> <p>Água: 4.700 L/mês Soda: 18 L/mês Peracético: 1,8 L/mês</p>	 <p>Fermentadores</p>
<p>Consumo Geral</p>			
<p>Soda</p>		<p>Ácido Peracético</p>	
<p>32,4 L/mês*R\$ 16,50/L =</p>		<p>3,24 L/mês*R\$ 45,00/L =</p>	
<p>R\$ 534,60/mês</p>		<p>R\$ 145,80/mês</p>	
<p>Água (DESO)</p>			
<p>29,76 a 74,76 m³/mês*R\$ 25,02/m³ =</p>		<p>29,76 a 74,76 m³/mês*R\$ 25,02/m³ =</p>	
<p>R\$ 744,00 a 1870,00/mês</p>		<p>R\$ 744,00 a 1870,00/mês</p>	

Em seguida, observou-se que seriam necessárias adaptações técnicas e a instalação de equipamentos para a linha de produção dos tanques fermentadores. A fim de possibilitar o reuso das correntes conforme o diagrama de fontes de água elaborado na Figura 20, foram idealizados dois cenários para a planta industrial da cervejaria local.

Para o Cenário 1, seria necessário o acréscimo de 4 válvulas mecânicas de controle de fluxo temporizador (ELGO- Emt1701) e de cerca de 20 metros de tubulação em aço inoxidável, conforme ilustra a Figura 23. Esta válvula temporizadora permitiria o fluxo das correntes de reuso no momento exato em que a operação abastecedora atinge a concentração de entrada necessária da operação receptora. Para este cenário, cada válvula mecânica custa R\$ 1000,00 e o metro de tubulação R\$ 50,00. Portanto, faz-se necessário um investimento inicial de R\$ 5.000,00.

Para o Cenário 2, faz-se necessário a aquisição de 2 tanques de armazenamento (2300 L) e de cerca de 60 m de tubulação, ambos com material de aço inoxidável, conforme ilustra a Figura 24. O funcionamento deste sistema prevê o suprimento do tanque de armazenamento com as correntes de reuso das operações fornecedoras selecionadas e se utilizaria do sistema de bombeamento que já existe na cervejaria local para prover a demanda das operações receptoras. Considerando que o valor de mercado para cada tanque custa R\$ 5.000,00 e o metro de tubulação R\$ 50,00, estimou-se um custo de R\$ 13.000,00 para aplicação deste cenário.

Figura 23- Planta industrial para o Cenário 1 com válvulas temporizadoras

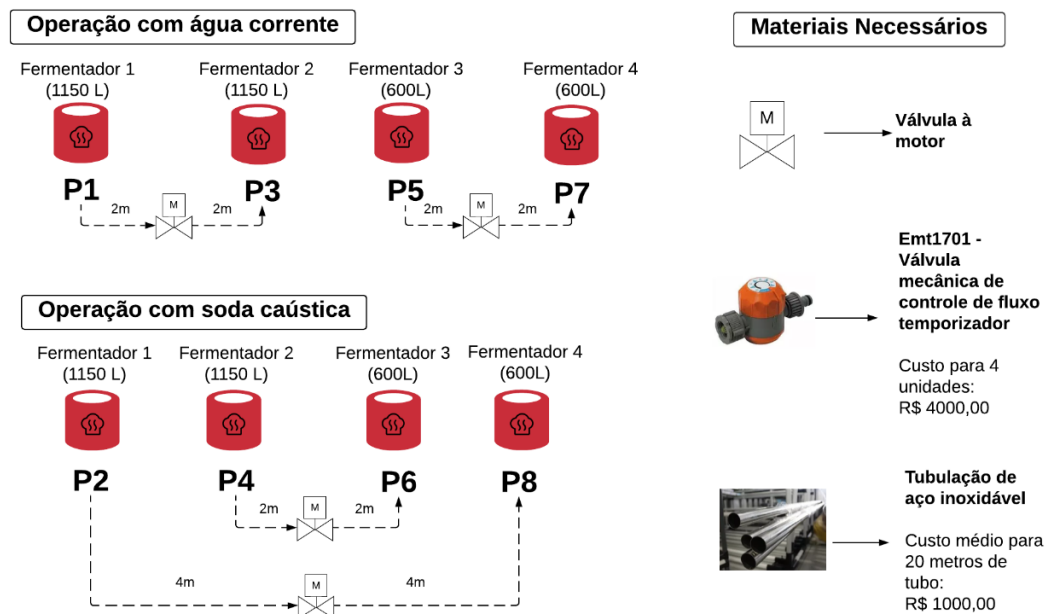
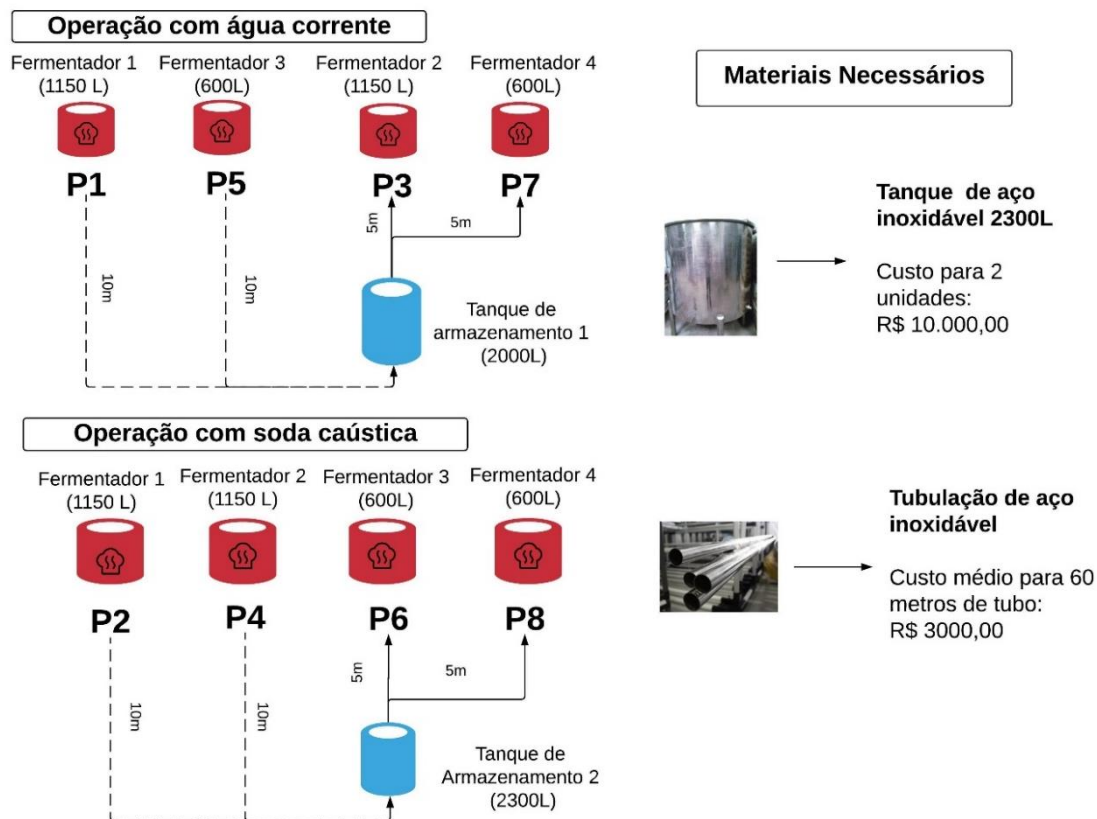


Figura 24- Planta industrial para o Cenário 2 com tanques de armazenamento



Deste modo, o melhor cenário técnico-econômico demonstrou ser o Cenário 1, com um custo de instalação inicial estimado no valor de R\$ 5.000. Visto que o resultado do DFA proporcionou uma economia de 45,33%, equivalente à 68,26 L/h de água, ou seja 819,12 L/ano, e ainda agregaria uma imagem ambiental à indústria, podendo ser explorada pelo *marketing* verde. Entretanto, considerando uma taxa fixa do metro cúbico de R\$ 25,02 (DESO, 2019) para a cidade de Aracaju, têm-se uma economia de apenas R\$ 20,50 por ano, sendo necessários 250 anos para ser obtido o “*payback*” do investimento. Além disso, de acordo com os dados fornecidos pelos operadores e apresentados na Figura 22, a cervejaria tem um consumo anual de água que atinge um máximo de R\$ 1.870,00, ou seja, a economia financeira obtida com o reuso reduziria apenas 1,09% deste valor.

Nestes termos, entende-se que a aplicação do DFA é viável tecnicamente para a cervejaria local, contudo, devido ao pequeno volume de seus tanques e da pouca frequência nas operações de limpeza dos fermentadores, torna-se pouco recomendada à instalação dos equipamentos, tendo em vista um retorno financeiro que excederia o limite de tempo aceitável.

Por fim, ressalta-se que qualquer investimento em reuso de águas possui um potencial de ser explorado através da estratégia de *marketing* verde. É o que afirmam Silva *et al.*, (2008) em sua pesquisa com 26% das empresas certificadas pela ISO 14001 no Brasil. Os autores evidenciaram sobretudo as vantagens competitivas conquistadas a partir de uma imagem de responsabilidade ambiental da empresa, uma vez que a prática correta valoriza significativamente seus produtos e a marca da companhia. Dessa forma, têm-se um valor agregado ao produto final e conquista de uma preferência de compra cada vez maior, contabilizando, com isso, ganhos de mercado.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A proposta de apresentar o uso do algoritmo DFA incorporado a dados e processos representativos de uma cervejaria de pequeno porte permitiu gerar um cenário, dentre vários alternativos, que demonstrasse uma redução de 45,33% da vazão de limpeza do tanque de fermentação.

Foi possível verificar que a rotina de programação empregada através do Mathcad se apresentou de maneira fácil e pratica para os objetivos desse estudo.

A importância deste trabalho se consolida ao propor reduções do consumo da água, um bem essencial à sociedade, indústria e comércio, porém que já se encontra em escassez em algumas regiões. Considera-se ainda que a aplicação do DFA, de eficiência estabelecida na revisão bibliográfica, até então pouco explorada na indústria cervejeira, em associação com o *software* Mathcad é uma alternativa que pode auxiliar à gestão sustentável do setor.

As equações definidas na Metodologia foram empregadas em etapas e otimizaram a execução dos cálculos inerentes ao procedimento DFA. A validação das rotinas se deu a partir de dados da literatura e os cenários foram gerados com base na DQO da água residuária de limpeza de um fermentador. Deste modo, foram construídas as redes de água “Sem Reuso” e “Com Reuso”, para configuração do melhor cenário de reuso.

Considerando as restrições para uma cervejaria de pequeno porte, os resultados do presente trabalho foram satisfatórios tecnicamente, de forma que a redução do uso de água, após aplicar um sistema de reuso, alcançou o total de 68,26 litros por hora de água. Contudo, entende-se que a redução com o consumo de água potável, estimada em 1,09% da despesa anual, é inexpressiva economicamente para a cervejaria, pois o investimento inicial necessário de equipamentos e instalações para implementação do cenário proposto foi estimado em R\$ 5.000,00, pouco recomendado devido ao *payback* apresentado.

Contudo, através de pequenos ajustes, as rotinas criadas poderiam ser utilizadas para a simulação do DFA em processos industriais cervejeiros de grande porte, os quais devido ao grande volume dos tanques e maior frequência das operações tenderiam a apresentar um *payback* mais atrativo.

Por fim, para complementar o presente estudo e ampliar os resultados obtidos, são feitas as seguintes sugestões:

- Coletar amostras de um maior número de tanques da cervejaria e contemplar operações além da fermentação. Desta forma seria possível criar cenários mais heterogêneos e, conseqüentemente, obter um melhor reaproveitamento das correntes geradas.
- Realizar a análise para um maior número de contaminantes, que não somente a DQO, pois a consideração de multicontaminantes resultaria em valores mais fidedignos da realidade industrial.
- Obter demais dados da cervejaria, como, por exemplo: as despesas anuais para o consumo de água, insumos, produtos de limpeza e energia; a folha de pagamentos dos funcionários e a planta baixa da fábrica. Assim sendo, a avaliação técnico-econômica tornar-se-ia mais precisa e focada em otimizar os processos produtivos da cervejaria.
- Obter dados de cervejarias de grande porte, a fim de comparar os resultados obtidos e analisar a aplicabilidade do DFA em maior escala. Através desta análise, poderia ser possível identificar estratégias operacionais úteis à cervejaria local.
- Aprimorar a rotina do código desenvolvido no *software* Mathcad de modo a contemplar a análise para um maior número de operações e contaminantes.
- Aplicar a regeneração e reuso de correntes nos cenários de DFA propostos, a fim de obter possibilidades de reciclagem de água na cervejaria. Em seguida, verificar técnica e economicamente a viabilidade destas adaptações.

.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, L. G.; GURGEL, I.D.; NETO, H.F.C.; MELO, C.H.; COSTA, ANDRÉ. **O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano**, 2012.

ANA, Agencia Nacional das Águas. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos**, 2017.

CARLÃO, L.F.B. **A escassez de água no mundo não é mais uma hipótese ou teoria: é o alerta para a mudança do modelo de desenvolvimento humano**, 2018.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA. **Controle de Qualidade de Cervejas**. 2010

FOO, D. C. Y.; EL-HALWAGI, M. M.; TAN, R. R. **Recent advances in sustainable process design and optimization**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd: London. Vol. 3., 2012.

GOMES, J.F.S.; EDUARDO M. QUEIROZ, FERNANDO L.P. PESSOA. **Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant**, 2007.

GOVERNO DE SERGIPE, ASSESSORIA ECONÔMICA. **Avaliação dos impactos econômicos e sociais da redução da vazão do São Francisco sobre o estado de Sergipe**. 2017.

Disponível em:
<http://www.agencia.se.gov.br/uploads/ckeditor/attachments/41/nota_tecnica_sao_francisco.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

GRANER, C.A.F; ZUCCARI, M.L; PINHO, S.Z. **Determinação da demanda química de oxigênio em águas por espectrofotometria simultânea dos íons crômio (III) e dicromato**, São Paulo, 1998.

HANS BENKER. **Practical use of Mathcad - solving mathematical problems with a computer algebra system**, 1999.

HELLA TOKOS & ZORKA NOVAK PINTARIC. **Synthesis of batch water network for a brewery plant**, 2009.

K. LAQUA; W.H. MELHUSH; AND M. ZANDER. **Part Vii: Molecular Absorption Spectroscopy, Ultraviolet and Visible (UV/VIS)**, 1988.

KOCHENBORGER, GUILHERME. **Tratamento físico-químico para efluente de cervejaria**. Passo Fundo, 2012.

LIMA & WALTER. **Produção mais limpa e sustentabilidade na indústria de cerveja**, 2017.

MATHCAD. **MATHCAD PTC.** Disponível em: <<https://www.ptc.com/en/products/mathcad>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

MEGA, JÉSSICA FRANCIELI, ETNEY NEVES E CRISTIANO JOSÉ DE ANDRADE. **A produção da cerveja no brasil**, 2011.

MILAGRES, J.J.M; VÍCTOR HUGO ALVAREZ V; REINALDO, BERTOLA CANTARUTTI & JÚLIO CÉSAR LIMA NEVES. **Determinação de Fe, Zn, Cu E Mn extraídos do solo por diferentes extratores e dosados por espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido e espectrofotometria de absorção atômica**, 2007.

MIRRE, R. C. **Metodologia para o gerenciamento sustentável do reuso de águas e efluentes industriais por meio da integração de processos**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

MIRRE, REINALDO; YOKOYAMA, LÍDIA; PELLEGRINI PESSOA, FERNANDO LUIZ. **Reúso de efluentes industriais em refinarias de petróleo usando o método DFA para sistemas regenerativos**, 2011.

MMA, Agencia Nacional de Águas (ANA). **Água na indústria: usos e coeficientes técnicos**. 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/acesso-tematico/usos-da-agua/aguanaindustria_usoecoefficientestecnicos.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2018.

MOHAMMADNEJAD, S.; R. NABI BIDHENDI, G.; MEHRDADI, N. **Water pinch analysis in oil refinery using regeneration reuse and recycling consideration**. *Desalination*, v. 265, p. 255-265, 2010.

MOREIRA, R. C., **Minimização de efluentes em uma unidade de tratamento de água industrial**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

NASCIMENTO, J.Q; DIONÍSIO, A.G.G; NASCIMENTO, E.C.L; FREITAS, S.K.B; ARAÚJO, M.C.U. **Análise screening de vinhos empregando um analisador fluxo-batelada, espectroscopia UV-VIS e quimiometria**, *Quím. Nova* vol.33 nº.2, São Paulo 2010.

OLIVEIRA MOURA, MARIANNA. **Proposta de reuso de águas residuárias utilizando diagrama de fontes de água: caso de uma fábrica de papel**. 2017. 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheira Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Sergipe.

PEIXOTO, T. C. L. C. **Reuso de água: comparação entre os métodos DFA, programação linear e programação não linear**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

REBELLO, Flavia de Floriani Pozza. **Produção de cerveja**, Revista Agrogeoambiental – Dezembro, 2009.

SALDANHA, T.C.B, E MÁRIO CÉSAR U. DE ARAÚJO. **Análise multicomponente simultânea por espectrofotometria de absorção molecular UV-VIS**, 1999.

SANTOS, Mateus Sales. **CETESB - Cervejas e refrigerantes**, São Paulo, 2005.

SHIKLOMANOV. **The Water Cycle**. 1993. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SILVA, A.A; PRISCILLA AZEVEDO ENOKI; SAMIR HUSSAIN NAMI ADUM; MARIANA ZANCHETTA FERREIRA; CAMILA APARECIDA AURELIANO; SHEILA DE LIMA VALDEVINO. **Estratégias de marketing verde na percepção de compra dos consumidores na grande são paulo**, 2008.

SORIANO, ÉRICO *et al.* **Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres**. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00021.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2018.

TAVARES, E.G, AGOSTINHO OLI KOPPE PEREIRA, CLEIDE CALGARO. **Da sociedade industrial à sociedade de risco: abordagens acerca da relação direta e proporcional entre atividade econômica e aumento do risco ecológico segundo as obras de ulrich beck**, Revista Jurídica, 2017.

TORRES, T. L¹ JOSIANI CORDOVA DE OLIVEIRA², CAMILA ANGELICA BAUM³, VALTER ANTONIO BECEGATO¹¹, JAIRO AFONSO HENKES. **Gestão do uso da água na indústria: aplicação do reúso e recuperação**. Florianópolis, 2018.

ULSON DE SOUZA, ANTÔNIO AUGUSTO *et al.* **The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water**. 2010.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344910001370>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

UNESCO, Unesdoc. **Relatório mundial das nações unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos**. 2016. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244041por.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

UNEP, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Thecnical report series nº 33**, 1996.

WANG AND SMITH, **Wastewater minimization**. Great Britain, 1993.

YANG, Y. H.; LOU, H. H.; HUANG, Y. L. **Synthesis of an optimal wastewater reuse network**. *Waste management*, v. 20, p. 311-319, 2000.

APÊNDICE 1- Código fonte do Programa Sem Reuso para operações com 2 intervalos.

sr2 - Programa Sem Reuso (2 Intervalos)

```
sr2(Qlim,Ce,C1,C2,C3)=
    "INTERVALO 1"
    Ccl1 ← Qlim · (C2 - C1)
    Vf1 ←  $\frac{Ccl1}{C2 - Ce}$ 
    cc1 ←  $\frac{Vf1}{1000} \cdot (C2 - Ce)$ 
    ccl1 ←  $\frac{Ccl1}{1000}$ 
    Dec1 ← ccl1 - cc1
    R1 ←  $\frac{Dec1}{C2 - Ce} \cdot 1000$ 

    "INTERVALO 2"
    C1 ← C2
    C2 ← C3
    Vf2 ← Vf1 + R1

    Ccl2 ← Qlim · (C2 - C1)
    cc2 ←  $\frac{Vf2}{1000} \cdot (C2 - C1)$ 
    ccl2 ←  $\frac{Ccl2}{1000}$ 
    Dec2 ← ccl2 - cc2
    R2 ←  $\frac{Dec2}{C2 - Ce} \cdot 1000$ 

    Vf3 ← Vf2 + R2

    return [
        "Ccl (kg/h)" "Vf (ton/h)" "vazao (t/h) disponivel" "concentracao (ppm) de " "H2O (t/h) limpa adicionada="
        Ccl1 Vf1 Vf3 C2 Vf1 + R1 + R2
        Ccl2 Vf2 " " " " " "
    ]
```

APÊNDICE 2 -Código fonte do Programa Sem Reuso para operações com 3 intervalos.

sr3 - Programa Sem Reuso (3 Intervalos)

```

sr3 (Qlim,Ce,C1,C2,C3,C4)=
  "INTERVALO 1"
  Ccl1 ← Qlim · (C2 - C1)
  Vf1 ←  $\frac{Ccl1}{C2 - Ce}$ 
  cc1 ←  $\frac{Vf1}{1000} \cdot (C2 - Ce)$ 
  ccl1 ←  $\frac{Ccl1}{1000}$ 
  Dec1 ← cc1 - cc1
  R1 ←  $\frac{Dec1}{C2 - Ce} \cdot 1000$ 

  "INTERVALO 2"
  C1 ← C2
  C2 ← C3
  Vf2 ← Vf1 + R1

  Ccl2 ← Qlim · (C2 - C1)
  cc2 ←  $\frac{Vf2}{1000} \cdot (C2 - C1)$ 
  ccl2 ←  $\frac{Ccl2}{1000}$ 
  Dec2 ← cc2 - cc2
  R2 ←  $\frac{Dec2}{C2 - Ce} \cdot 1000$ 

  "INTERVALO 3"
  C1 ← C3
  C2 ← C4
  Vf3 ← Vf2 + R2

  Ccl3 ← Qlim · (C2 - C1)
  cc3 ←  $\frac{Vf3}{1000} \cdot (C2 - C1)$ 
  ccl3 ←  $\frac{Ccl3}{1000}$ 
  Dec3 ← cc3 - cc3
  R3 ←  $\frac{Dec3}{C2 - Ce} \cdot 1000$ 

  Vf4 ← Vf3 + R3

  return [
    "Ccl (kg/h)" "Vf (ton/h)" "vazao(t/h) disponivel" "concentracao (ppm) de " "H2O(t/h) limpa adicionada="
    Ccl1 Vf1 Vf4 C2 Vf1 + R1 + R2 + R3
    Ccl2 Vf2
    Ccl3 Vf3
  ]

```


APÊNDICE 3- Código fonte do Programa Sem Reuso para operações com 4 intervalos.

sr4 - Programa Sem Reuso (4 Intervalos)

```
sr4(Qlim,Ce,C1,C2,C3,C4,C5)=
"INTERVALO 1"
Ccd1 ← Qlim · (C2 - C1)
Ccd1 ← Ccd1
Vf1 ← C2 - Ce
cc1 ← Vf1 · (C2 - Ce)
cc1 ← Ccd1
cc1 ← Ccd1
Dcc1 ← cc1 - cc1
R1 ← Dcc1 · 1000
R1 ← C2 - Ce

"INTERVALO 2"
C1 ← C2
C2 ← C3
Vf2 ← Vf1 + R1

Ccd2 ← Qlim · (C2 - C1)
cc2 ← Vf2 · (C2 - C1)
cc2 ← Ccd2
cc2 ← Ccd2
Dcc2 ← cc2 - cc2
R2 ← Dcc2 · 1000
R2 ← C2 - Ce

"INTERVALO 3"
C1 ← C3
C2 ← C4
Vf3 ← Vf2 + R2
```

```
Ccd3 ← Qlim · (C2 - C1)
cc3 ← Vf3 · (C2 - C1)
cc3 ← Ccd3
cc3 ← Ccd3
Dcc3 ← cc3 - cc3
R3 ← Dcc3 · 1000
R3 ← C2 - Ce
```

Vf4 ← Vf3 + R3

"INTERVALO 4"

C1 ← C4
C2 ← C5
Vf4 ← Vf3 + R3

```
Ccd4 ← Qlim · (C2 - C1)
cc4 ← Vf4 · (C2 - C1)
cc4 ← Ccd4
cc4 ← Ccd4
Dcc4 ← cc4 - cc4
R4 ← Dcc4 · 1000
R4 ← C2 - Ce
```

Vf5 ← Vf4 + R4

	"Ccd (kg/h)"	"Vf (ton/h)"	"vazao (t/h) disponível"	"concentracao (ppm) de"	"H2O (t/h) limpa adicionada="
return	Ccd1	Vf1	Vf5	C2	Vf1 + R1 + R2 + R3 + R4
	Ccd2	Vf2	"	"	"
	Ccd3	Vf3	"	"	"
	Ccd4	Vf4	"	"	"

APÊNDICE 4- Código fonte do Programa Com Reuso para operações com 2 intervalos
no MATHCAD.

cr2 - Programa Com Reuso (2 Intervalos)

```

cr2(Qlim,Ce1,Ce2,Cs1,Cs2,Vfex1,Vfex2):=
    "INTERVALO 1"
    Ccd1 ← Qlim • (Cs1 - Ce1)
    Cceex1 ← Vfex1 • (Cs1 - Ce1)
    Vf1 ←  $\left( \frac{Ccd1 - Cceex1}{Cs1} \right)$ 

    "INTERVALO 2"
    Ccd2 ← Qlim • (Cs2 - Ce2)
    Vf2 ← Vf1 + Vfex1
    Cceex2 ← (Vf2 + Vfex2) • (Cs2 - Ce2)

    Vf3 ←  $\left( \frac{Ccd2 - Cceex2}{Cs2} \right)$ 

    return 

|              |               |                 |                                            |
|--------------|---------------|-----------------|--------------------------------------------|
| "Cd1 (kg/h)" | "Vf1 (ton/h)" | "Vfex1 (ton/h)" | "Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)" |
| Ccd1         | Vf1           | Vfex1           | Vf1 + Vf3                                  |
| Ccd2         | Vf2           | Vfex2           | " "                                        |
| " "          | " "           | Vf3             | " "                                        |


```

APÊNDICE 5- Código fonte do Programa Com Reuso para operações com 3 intervalos no MATHCAD.

cr3 - Programa Com Reuso (3 Intervalos)

```

cr3(Qlim,Ce1,Ce2,Ce3,Cs1,Cs2,Cs3,Vfex1,Vfex2,Vfex3):=
|
| "INTERVALO 1"
| Cc1←Qlim·(Cs1−Ce1)
| Cce1←Vfex1·(Cs1−Ce1)
| Vf1← $\frac{Cc1−Cce1}{Cs1}$ 
| Vaf1← $\frac{(Cc1)−(Vf1·(Cs1−Ce1))}{Cs1}$ 
|
| "INTERVALO 2"
| Cc2←Qlim·(Cs2−Ce2)
| Vf2←Vf1+Vfex1+Vaf1
| Cce2←(Vf2+Vfex2)·(Cs2−Ce2)
| Vaf2← $\frac{(Cc2)−(Vf2·(Cs2−Ce2))}{Cs2}$ 
|
| "INTERVALO 3"
| Cc3←Qlim·(Cs3−Ce3)
| Vf3←Vf2+Vfex2+Vaf2
| Cce3←(Vf3+Vfex3)·(Cs3−Ce3)
|
| Vf4← $\frac{(Cc3−Cce3)}{Cs3}$ 
|
| "Cc1 (kg/h)" "Vf1 (ton/h)" "Vfex1 (ton/h)" "Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"
|
| return 

|     |     |       |         |
|-----|-----|-------|---------|
| Cc1 | Vf1 | Vfex1 | Vf1+Vf4 |
| Cc2 | Vf2 | Vfex2 | " "     |
| Cc3 | Vf3 | Vfex3 | " "     |
| " " | Vf4 | " "   | " "     |


|

```

APÊNDICE 6- Código fonte do Programa Com Reuso para operações com 4 intervalos
no MATHCAD.

cr4 - Programa Com Reuso (4 Intervalos)

```
cr4(Qlim,Ce1,Ce2,Ce3,Ce4,Cs1,Cs2,Cs3,Cs4,Vfex1,Vfex2,Vfex3,Vfex4):=
|
| "INTERVALO 1"
| Ccd1 ← Qlim · (Cs1 - Ce1)
| Cceex1 ← Vfex1 · (Cs1 - Ce1)
| Vf1 ←  $\left( \frac{Ccd1 - Cceex1}{Cs1} \right)$ 
|
| "INTERVALO 2"
| Ccd2 ← Qlim · (Cs2 - Ce2)
| Vf2 ← Vf1 + Vfex1
| Cceex2 ← (Vf2 + Vfex2) · (Cs2 - Ce2)
|
| "INTERVALO 3"
| Ccd3 ← Qlim · (Cs3 - Ce3)
| Vf3 ← Vf2 + Vfex2
| Cceex3 ← (Vf3 + Vfex3) · (Cs3 - Ce3)
|
| "INTERVALO 4"
| Ccd4 ← Qlim · (Cs4 - Ce4)
| Vf4 ← Vf3 + Vfex3
| Cceex4 ← (Vf4 + Vfex4) · (Cs4 - Ce4)
| Vf5 ←  $\left( \frac{Ccd4 - Cceex4}{Cs4} \right)$ 
|
|
| "Ccd (kg/h)" "Vf (ton/h)" "Vfex (ton/h)" "Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)"
| Ccd1 Vf1 Vfex1 Vf1 + Vf5
| Ccd2 Vf2 Vfex2 "-"
| Ccd3 Vf3 Vfex3 "-"
| Ccd4 Vf4 Vfex4 "-"
| "-" Vf5 "-" "-"
return
```

APÊNDICE 7- Validação do estudo de Cenário 1 do estudo de caso Mirre (2012)

Operação P1

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 20 t/h
Cmax entrada: 24.25 ppm
Cmax saída: 425ppm

$$sr2(Q_{lim}, C_e, C_1, C_2, C_3)$$

$$sr2(20, 0, 0, 0.1, 0.2) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 2 & 20 & 20 & 0.2 & 20 \\ 2 & 20 & \text{" " } & \text{" " } & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P2

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 16 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 299 ppm

$$sr2(Q_{lim}, C_e, C_1, C_2, C_3)$$

$$sr2(16, 0, 0.25, 0.4, 0.5) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 2.4 & 6 & 8 & 0.5 & 8 \\ 1.6 & 6 & \text{" " } & \text{" " } & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P3

Reuso: **COM** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 15 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 980 ppm

$$cr1(Q_{lim}, C_e, C_s, Vfex1)$$

$$cr1(15, 0, 0.1, 7.5) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"Vfex (ton/h)" } & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)" } \\ 1.5 & 7.5 & 7.5 & 7.5 \\ \text{" " } & \text{" " } & 15 & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P4

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 24 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 330 ppm

$$sr1(Q_{lim}, C_e, C_1, C_2)$$

$$sr1(24, 0, 0.25, 0.4) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 3.6 & 9 & 9 & 0.4 & 9 \end{bmatrix}$$

Operação P5

Reuso: **COM** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 15 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 329 ppm

$$cr1(Q_{lim}, C_e, C_s, Vfex1)$$

$$cr1(15, 0, 0.1, 3.75) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"Vfex (ton/h)" } & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)" } \\ 1.5 & 11.25 & 3.75 & 11.25 \\ \text{" " } & \text{" " } & 15 & \text{" " } \end{bmatrix}$$

**Volume Total de
Água Fresca
Consumida:**

$$(20 + 8 + 7.5 + 9 + 11.25) \cdot \left(\frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right) = \frac{55.75 \cdot \text{ton}}{\text{hr}}$$

APÊNDICE 8- Validação do estudo de Cenário 2 do estudo Mirre (2012)

Operação P1

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 20 t/h
Cmax entrada: 24.25 ppm
Cmax saída: 425ppm

$$sr2(Qlim, Ce, C1, C2, C3)$$

$$sr2(20, 0, 0, 0.1, 0.2) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 2 & 20 & 20 & 0.2 & 20 \\ 2 & 20 & \text{" " } & \text{" " } & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P2

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 2
Qlim: 16 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 299 ppm

$$sr2(Qlim, Ce, C1, C2, C3)$$

$$sr2(16, 0, 0.25, 0.4, 0.5) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 2.4 & 6 & 8 & 0.5 & 8 \\ 1.6 & 6 & \text{" " } & \text{" " } & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P3

Reuso: **COM** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 15 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 980 ppm

$$cr1(Qlim, Ce1, Cs1, Vfex1)$$

$$cr1(15, 0, 0.1, 7.5) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"Vfex (ton/h)" } & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)" } \\ 1.5 & 7.5 & 7.5 & 7.5 \\ \text{" " } & \text{" " } & 15 & \text{" " } \end{bmatrix}$$

Operação P4

Reuso: **Sem** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 24 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 330 ppm

$$sr1(Qlim, Ce, C1, C2)$$

$$sr1(24, 0, 0.25, 0.4) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"vazao(t/h) disponível" } & \text{"concentracao (ppm) de " } & \text{"H2O(t/h) limpa adicionada="} \\ 3.6 & 9 & 9 & 0.4 & 9 \end{bmatrix}$$

Operação P5

Reuso: **COM** Reuso
N intervalos: 1
Qlim: 15 t/h
Cmax entrada: 100 ppm
Cmax saída: 329 ppm

$$cr1(Qlim, Ce1, Cs1, Vfex1)$$

$$cr1(15, 0.1, 0.1, 15) = \begin{bmatrix} \text{"Ccl (kg/h)" } & \text{"Vf (ton/h)" } & \text{"Vfex (ton/h)" } & \text{"Volume Total Gasto de H2O Fresca (ton/h)" } \\ 0 & 0 & 15 & 0 \\ \text{" " } & \text{" " } & 15 & \text{" " } \end{bmatrix}$$

**Volume Total de
Água Fresca
Consumida:**

$$(20 + 8 + 7.5 + 9 + 0) \cdot \left(\frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right) \rightarrow \boxed{44.5 \cdot \frac{\text{ton}}{\text{hr}}}$$